

VŠB – Technická univerzita Ostrava

Fakulta strojní

Katedra automatizační techniky a řízení

Konfigurace řídicího systému pomocí simulace Hardware in the
Loop

Configuration of the Control System using the Hardware in the
Loop Simulation

Student: Michal Szymeczek

Vedoucí bakalářské práce: Prof. Ing. Petr Noskievič, CSc.

Ostrava 2010

Zadání bakalářské práce

Student:

Michal Szymeczek

Studijní program:

B3943 Mechatronika

Studijní obor:

3906R006 Mechatronické systémy

Téma:

Konfigurace řídicího systému pomocí simulace Hardware in the Loop

Configuration of the Control System using the Hardware in the Loop Simulation

Zásady pro vypracování:

- 1.Charakterizujte postup simulace HW in the Loop a možnosti jeho využití v technické praxi.
- 2.Sestavte a realizujte na osobním počítači simulační model hydraulického servopohonu.
- 3.Charakterizujte číslicový řídicí systém HNC100, uveďte možnosti použití různých algoritmů řízení pro realizaci polohových servomechanismů.
- 4.Proved'te propojení osobního počítače a řídicího systému pomocí multifunkční měřicí karty za účelem simulace HW in the Loop. Zpracujte dokumentaci k propojení PC a řídicího systému HNC100.
- 5.Proved'te nastavení parametrů řídicího systému HNC100 pro různé parametry hydraulického servopohonu odpovídající různým průmyslovým aplikacím.
- 6.Zhodnoťte dosažené výsledky a možnosti jejich využití v technické praxi.

Seznam doporučené odborné literatury:

- [1]Noskievič, P.: Modelování a identifikace systémů. I.vydání, Ostrava, MONTANEX a.s., 1999, ISBN 80-7225-030-2.
- [2]Nepřaž,F.-Nevrlý, J.-Peňáz,V.-Třetina,K.: Modelování systémů s hydraulickými mechanismy. Bosch Rexroth, spol.s.r.o., Brno, 2002. ISBN 80-214-2187-8.
- [3]Valášek, M.: Mechatronika. Skripta ČVUT Praha, 1995, ISBN 80-01-1-01276-X.
- [4]Parker: Electrohydraulic System Engineering. Parker Hannifin Corporation, 2007.
- [5]Isermann, R.: Fahrdynamik-Regelung. Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik. Vieweg, Wiesbaden, 2006. ISBN 13 978-3-8348-0109-8.
- [6]Bosch-Rexroth: Dokumentace k řídicímu systému HNC100.
- [7]National Instruments: Dokumentace k multifunkční měřicí kartě.

Formální náležitosti a rozsah bakalářské práce stanoví pokyny pro vypracování zveřejněné na webových stránkách fakulty.

Vedoucí bakalářské práce: **prof. Ing. Petr Noskivič, CSc.**

Datum zadání: 02.11.2009

Datum odevzdání: 21.05.2010



vedoucí katedry



prof. Ing. Petr Noskivič, CSc.
prorektor pro studium

Místopřísežné prohlášení studenta

Prohlašuji, že jsem celou bakalářskou práci včetně příloh vypracoval samostatně pod vedením vedoucího bakalářské práce a uvedl jsem všechny použité podklady a literaturu.

V Ostravě 21. 5. 2010

Michal Szymeczek
.....

Michal Szymeczek

Prohlašuji, že

- jsem byl seznámen s tím, že na moji bakalářskou práci se plně vztahuje zákon č. 121/2000 Sb., autorský zákon, zejména § 35 – užití díla v rámci občanských a náboženských obřadů, v rámci školních představení a užití díla školního a § 60 – školní dílo.
- беру на ве́домі, že Vysoká škola báňská – Technická univerzita Ostrava (dále jen „VŠB-TUO“) má právo nevýdělečně ke své vnitřní potřebě bakalářskou práci užít (§ 35 odst. 3).
- souhlasím s tím, že bakalářská práce bude v elektronické podobě uložena v Ústřední knihovně VŠB-TUO k nahlédnutí a jeden výtisk bude uložen u vedoucího bakalářské práce. Souhlasím s tím, že údaje o kvalifikační práci budou zveřejněny v informačním systému VŠB-TUO.
- bylo sjednáno, že s VŠB-TUO, v případě zájmu z její strany, uzavřu licenční smlouvu s oprávněními užít dílo v rozsahu § 12 odst. 4 autorského zákona.
- bylo sjednáno, že užít své dílo – bakalářskou práci nebo poskytnout licenci k jejímu využití mohu jen se souhlasem VŠB-TUO, která je oprávněna v takovém případě ode mne požadovat přiměřený příspěvek na úhradu nákladů, které byly VŠB-TUO na vytvoření díla vynaloženy (až do jejich skutečné výše).
- беру на ве́домі, že odevzdáním své práce souhlasím se zveřejněním své práce podle zákona č. 111/1998 Sb., o vysokých školách a o změně a doplnění dalších zákonů (zákon o vysokých školách), ve znění pozdějších předpisů, bez ohledu na výsledek její obhajoby.

V Ostravě 21. 5. 2010



Michal Szymeczek

Michal Szymeczek

Rožnovská 344

Frenštát pod Radhoštěm

74401

ANOTACE BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

SZYMECZEK, M. *Konfigurace řídicího systému pomocí simulace Hardware in the Loop: bakalářská práce*. Ostrava: VŠB – Technická univerzita Ostrava, Fakulta strojní, Katedra automatizační techniky a řízení, 2010, 50s. Vedoucí práce: Noskievič, P.

Bakalářská práce se zabývá konfigurací řídicího systému technikou Hardware in the Loop. V úvodu je vysvětlena metoda HiL a popsána funkce servopohonů. Následuje seznámení s vytvářením matematických modelů elektrohydraulických servopohonů. Dále jsou popsány různé průmyslové aplikace elektrohydraulických polohových servopohonů. Pro tyto aplikace je proveden návrh řídicího algoritmu včetně nastavení parametrů řídicího systému HNC100. Pomocí simulace HiL je otestována správnost nastavených parametrů řídicího systému, které jsou následně doladěny. Závěr práce popisuje výhody použití HiL simulace a její možné uplatnění v technické praxi.

ANNOTATION OF BACHELOR THESIS

SZYMECZEK, M. *Configuration of the Control System using the Hardware in the Loop Simulation: Bachelor Thesis*. Ostrava: VŠB – Technical University of Ostrava, Faculty of Mechanical Engineering, Department of Control Systems and Instrumentation, 2010, 50p. Thesis head: Noskievič, P.

The Bachelor thesis deals with the configuration of control system by the technique Hardware in the Loop. The method Hardware in the Loop is explained and the functions of the servo drives are also described in the introduction. The introduction of creating the mathematical models of electro-hydraulic servo drives follows. Various industrial applications of electro-hydraulic positional servo drives are described further. The design of control algorithm is done for these applications including the parameter setting of control system HNC100. By means of simulation HiL the set parameters accuracy of control system is tested, the parameters are consequently tuned. The conclusion of the thesis describes the advantages of HiL simulation usage and its possible use in the technical practice.

Obsah

Seznam použitých zkratk	7
Seznam použitého značení	7
1 Úvod	10
2 Metoda Hardware in the Loop	11
2.1 Popis simulace metodou HiL	11
2.2 Možnosti využití v technické praxi	11
3 Sestavení modelu elektrohydraulického servopohonu	13
3.1 Elektrohydraulický servopohon	13
3.2 Sestavování matematických modelů	14
3.3 Úprava stávajícího modelu	15
4 Číslicový řídicí systém HNC100	19
4.1 Popis řídicího systému HNC100	19
4.2 Algoritmy řízení pro realizaci elektrohydraulických servopohonů	21
5 Propojení osobního PC s HNC100 za účelem HiL simulace	23
5.1 Multifunkční měřicí karta DAQCard-6036E	23
5.2 Real-Time Windows Target Toolbox	24
5.3 Propojení PC a HNC100	25
5.4 Program Win-Ped	25
5.5 Nastavení vstupů/výstupů a regulátoru	27
5.6 Programování HNC100	29
6 Elektrohydraulický výukový stand	30
6.1 Parametry modelu	31
6.2 Návrh řídicího systému	34
6.3 Ověření navrženého řídicího algoritmu metodou HiL	34
7 Elektrohydraulický servopohon pódiového stolu divadla v Krakově	37
7.1 Parametry modelu	38

7.2	Návrh řídicího systému	43
7.3	Ověření navrženého řídicího algoritmu metodou HiL	43
8	Elektrohydraulický servopohon stavěcího zařízení.....	45
8.1	Parametry modelu	45
8.2	Návrh řídicího systému	49
8.3	Ověření navrženého řídicího algoritmu metodou HiL.....	50
9	Závěr.....	51
	Seznam použité literatury	53

Seznam použitých zkratk

AFKCH	Amplitudo fázová kmitočtová charakteristika
DAQ	Data Acquisition – sběr dat
HiL	Hardware in the Loop – hardware (technické vybavení počítače) ve smyčce
HNC	Hydraulic Numeric Control – číslicové hydraulické řízení
LAKCH	Logaritmická amplitudová kmitočtová charakteristika
NC	Numerical Control – číslicové řízení
P	Proporcionální regulátor
PC	Personal Computer – osobní počítač
PCMCIA	Personal Computer Memory Cards International Association – rozšiřující slot vyskytující se především v noteboocích
PIDT1	Proporcionálně integračně derivační regulátor se setrvačností prvního řádu
PT1	Proporcionální regulátor se setrvačností prvního řádu
REG	Regulátor

Seznam použitého značení

b	součinitel tlumení
B_{SV}	průtokové zesílení servoventilu
C_A	hydraulická kapacita prostoru A hydromotoru
C_B	hydraulická kapacita prostoru B hydromotoru
d	průměr pístu hydromotoru
d_A	průměr pístnice hydromotoru na straně A

d_B	průměr pístnice hydromotoru na straně B
$e(t)$	regulační odchylka
F	zatěžující síla
f_{HM}	vlastní frekvence hydromotoru
f_{SV}	vlastní frekvence servoventilu
$G(s)$	Laplaceův přenos
G_i	interní svodová propustnost
K	modul objemové stlačitelnosti kapalin
K_0	zesílení otevřeného regulačního obvodu
k_h	hydraulická tuhost
K_{HM}	zesílení hydromotoru
K_{krit}/ω_m	kritické zesílení regulačního obvodu normované na vlastní frekvenci
K_{Qx}	průtokové zesílení servoventilu
K_R	zesílení regulátoru
K_{Rkrit}	kritické zesílení regulátoru
K_{sn}	zesílení snímače
K_{SV}	zesílení servoventilu
m	hmotnost
p_A	tlak v komoře A hydromotoru
p_B	tlak v komoře B hydromotoru
Q_A	průtok v komoře A hydromotoru
Q_B	průtok v komoře B hydromotoru

Q_L	průtok způsobený průsakem z prostoru A do prostoru B
T	časová konstanta
$u(t)$	akční veličina
$v(t)$	poruchová veličina
V_{A0}	objem kapaliny pod tlakem při nulovém, resp. maximálním zdvihu hydromotoru v prostoru A
V_{B0}	objem kapaliny pod tlakem při nulovém, resp. maximálním zdvihu hydromotoru v prostoru B
v_{SVmax}	maximální rychlost šoupátka servoventilu
$w(t)$	žádaná hodnota
x_{MAX}	maximální zdvih hydromotoru
x_{SV0}	krytí šoupátka servoventilu
$y(t)$	regulovaná veličina
α	poměr činných ploch pístu
κ	poměr vlastních frekvencí servoventilu a hydromotoru
ζ_{HM}	součinitel poměrného tlumení hydromotoru
ζ_{SV}	součinitel poměrného tlumení servoventilu

1 Úvod

Cílem bakalářské práce je nakonfigurování řídicího systému pro řízení elektrohydraulických servopohonů pomocí Hardware in the Loop simulace. Simulace metodou Hardware in the Loop je vysvětlena v druhé kapitole. Jsou popsány její výhody, mezi které patří testování koncepcí před jejich výrobou, testování havarijních stavů či testování v laboratorních podmínkách. Popsáno je rovněž využití tohoto nástroje v různých průmyslových odvětvích.

Pro simulaci Hardware in the Loop je stěžejní matematický model reálného systému. Vytváření matematických modelů elektrohydraulických servopohonů je prováděno na základě analytické identifikace. Jednotlivé modely jsou tvořeny popsáním skutečné reality fyzikálními zákonitostmi. Tento postup je označován jako matematicko-fyzikální modelování. Metodika sestavování matematických modelů je popsána na úpravě modelu stávajícího, viz kapitola 3.3.

Jako řídicí systém je použit průmyslový regulátor HNC100 od firmy Bosch Rexroth AG. Jedná se o regulátor vhodný k použití v těžkých průmyslových podmínkách. Kvůli svému určení musí být odolný proti poruchám, vibracím otřesům a okolnímu prostředí. Pro vybrané průmyslové aplikace je vybrán algoritmus řízení, postup při jeho výběru popisuje kapitola 4.2.

V páté kapitole je popsáno propojení osobního počítače za účelem simulace Hardware in the Loop. Popsány jsou jednotlivé hardwarové doplňky, jako je například měřicí karta, i nastavení softwaru.

V posledních třech kapitolách jsou popsány 3 různé průmyslové aplikace. Nastíněn je postup určování parametrů všech modelů. Pro jednotlivé modely je vybrán řídicí algoritmus, který je poté ověřen simulací HiL. Průmyslové aplikace jsou vybrány záměrně tak, aby se ukázala rozmanitost použití elektrohydraulických servopohonů. Ač se regulační obvod nezmění, diametrálně rozdílné rozměry jednotlivých modelů si kladou rozdílné nároky na výběr řídicích algoritmů.

2 Metoda Hardware in the Loop

2.1 *Popis simulace metodou HiL*

Metoda Hardware in the Loop (dále jen HiL) simulace je anglický název metody do češtiny překládaný jako hardware ve smyčce nebo přesněji hardwarová simulace v uzavřené smyčce. Jedná se o nástroj umožňující propojení hardwaru (řídicího systému) s matematickým modelem (řízeným systémem) v uzavřené zpětnovazební smyčce. K simulaci touto metodou potřebujeme 2 základní prvky: reálný řídicí systém a matematický model.

Matematický model slouží ke konfiguraci řídicího systému. Řídicí systém generuje akční veličinu závislou na regulační odchylce, což je rozdíl mezi žádanou a skutečnou veličinou. Akční veličina vstupuje do modelu, ven z modelu vystupuje zpětnovazební veličina (skutečná hodnota), která je přivedena zpět do řídicího systému. Simulace takto pracuje v reálném čase. Výsledky simulace se velmi blíží realitě, jelikož propojení řídicího systému se snímači a akčními členy je provedeno tak, jak tomu bude ve skutečnosti. K tomu, aby výsledky odpovídaly realitě, potřebujeme dostatečně přesný matematický model, na kterém je přesnost simulace nejvíce závislá. Jakmile je řídicí systém nastaven podle daných požadavků, lze matematický model nahradit reálným řízeným systémem a porovnat výsledky.

2.2 *Možnosti využití v technické praxi*

Využití v technické praxi se nabízí ve všech oblastech, kde se uplatní hlavní výhoda této metody. Tou je bezesporu použití matematického modelu namísto skutečné řízené soustavy. Tato vlastnost nabízí široký rozsah použití. Z průmyslových odvětví využívajících tuto metodu jmenujme letectví, armádu či automobilový průmysl. Metoda HiL je ideální k testování řízení složitých úloh u komplexních soustav.

Z konkrétních aplikací v automobilovém průmyslu uvedu vyvíjení řídicích jednotek ABS systémů, řídicích jednotek motorů, nebo řídicích jednotek ve Formuli 1.

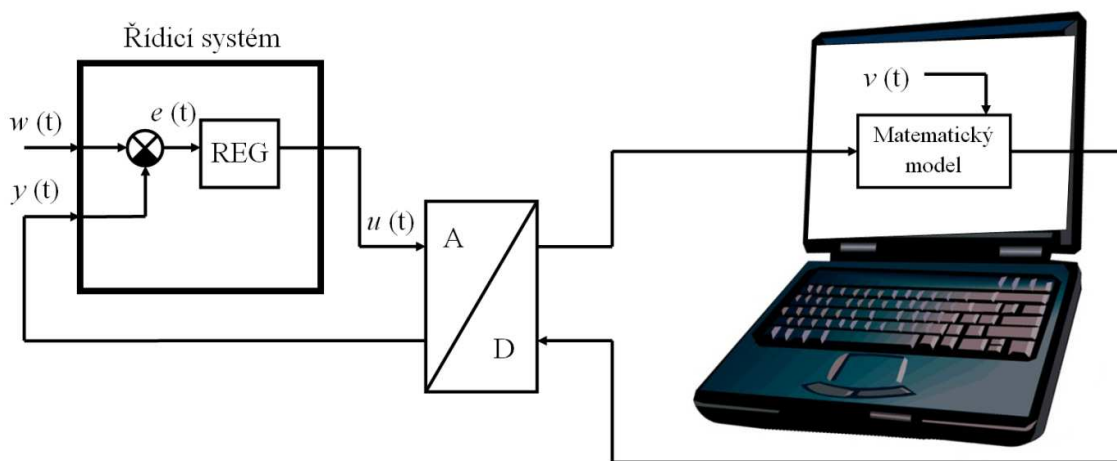
Nahrazení reálné řízené soustavy modelem nám dovoluje testovat takové havarijní stavy, které by u fyzické soustavy vedly k jejímu poškození nebo úplnému

zničení. Další uplatnění je ve zkoušení celých koncepcí před jejich samotnou výrobou, možnost testování v laboratorních podmínkách či simulování jediného parametru při nastavení ostatních parametrů na konstantní hodnotu. Konstruktor má šanci ještě před výrobou prvních prototypů testovat celé konstrukční celky nebo jednotlivé funkční prvky.

Simulace HiL je natolik univerzální, že s její pomocí lze ověřovat i řídicí algoritmy pro různé průmyslové aplikace před jejich nasazením či vyvíjet řídicí algoritmy zcela nové. Máme tedy ideální nástroj k testování řídicí i řízené soustavy.

Zdánlivá nevýhoda spočívá v nákladech na pořízení drahého softwaru, pořizovací cena modelů, či zaplacení lidí, kteří jsou schopni matematické modely vytvářet a mají určité zkušenosti v oblasti sestavování matematických modelů. Toto je jistě pádný argument, ovšem v konečném důsledku přináší metoda HiL značné finanční úspory. Užitím této metody se dá vyhnout vyrobení velkého množství nefunkčních prototypů, odhalit chybné koncepce před jejich samotnou výrobou. Jako příklad uvedu testování řídicích systémů letadel. Pokud by se tyto systémy testovaly přímo ve vzduchu, každý špatný návrh či nefunkčnost řídicího systému může mít fatální následky. V takovýchto případech už nejsou škody pouze v rovinně finanční, ale jde i o lidské zdraví a životy. Uvážíme-li výše popsání úspory plynoucí z použití simulace metodou HiL, zjistíme mnohonásobné převýšení nákladů nutných k její realizaci.

Na obrázku 1 je obecné schéma simulace metodou Hardware in the Loop. Význam veličin v obrázku je: $y(t)$...regulovaná veličina, $w(t)$...žádaná veličina, $e(t)$...regulační odchylka, $u(t)$...akční veličina, $v(t)$...poruchová veličina, REG...regulátor.



Obrázek 1 Schéma Hardware in the Loop simulace

3 Sestavení modelu elektrohydraulického servopohonu

Bakalářská práce se konkrétně zabývá konfigurací řídicího systému elektrohydraulického servopohonu.

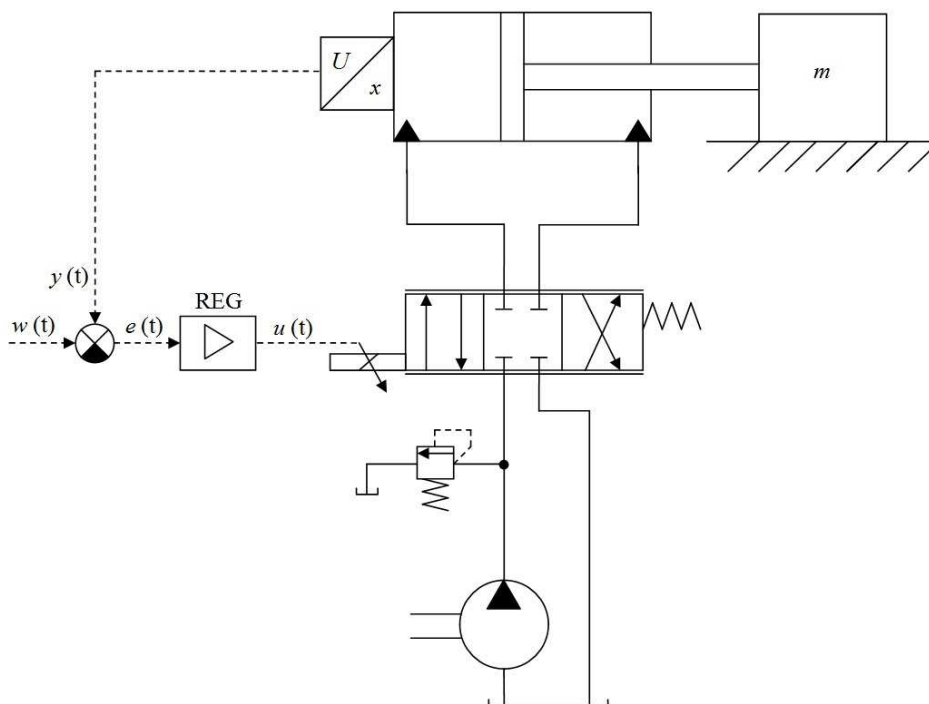
3.1 Elektrohydraulický servopohon

Elektrohydraulický servopohon je takový pohon, jehož pracovní látkou je kapalina – nejčastěji olej a který je řízen elektricky s tím, že odchylka od žádané veličiny je přivedena zpět na vstup. Pojem servo je používán velmi rozmanitě. Vyjádřeno zcela obecně, označuje funkci, při které malý vstupní signál vytváří velký výstupní signál (zesilovač) [Dörr, 1986]. Servomechanismy jsou tedy řízené regulační obvody pro regulaci polohy a jejich derivací podle času. Od servomechanismu požadujeme, aby výstupní veličina sledovala rychle a přesně změny vstupní veličiny v čase [Kopáček, 2005] a aby vyloučil vliv poruchy.

Elektrohydraulický servopohon je tvořen hydrogenerátorem, pojišťovacím ventilem, servoventilem a přímočarým hydromotorem. Hydrogenerátor do obvodu dodává pracovní kapalinu. Před přetížením jej chrání pojišťovací ventil, kterým nastavíme maximální pracovní tlak. O rozvod tlakové kapaliny se stará servoventil, kapalina je rozváděna do komor hydromotoru, jenž v obvodu představuje spotřebič.

Elektrohydraulické servopohony (viz obrázek 2) lze rozdělit do tří skupin:

- a) **Polohové** – používané např. u obráběcích strojů k souvislému řízení vzájemné polohy nástroje a obráběného materiálu. Dále pak k ovládání kormidel u letadel, lodí či raket. U průmyslových robotů jimi řídíme pohyb jednotlivých ramen. Využití naleznou také u nastavování polohy ventilů nebo šoupátek.
- b) **Rychlostní** – typicky užívané pro pohon včetně u obráběcích strojů s plynulou volbou otáček, které jsou nezávislé na zatížení řeznou silou.
- c) **Silové** – jejichž funkce i konstrukce je podobná polohovým servopohonům. Hlavní oblasti použití jsou u simulátorů zatížení, strojů pro trhačí a únavové zkoušky průmyslových zkušeben, ale i posilovačů řízení a brzd dopravních prostředků. [SOUČEK, 1992]



Obrázek 2 Zjednodušené hydraulické schéma elektrohydraulického servopohonu

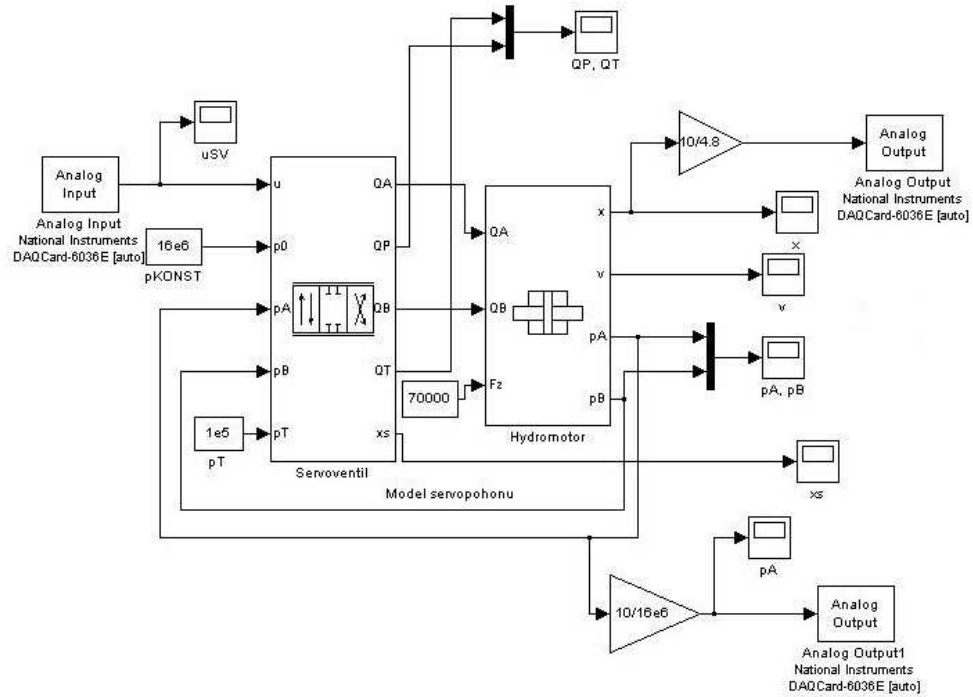
3.2 Sestavování matematických modelů

K sestavení matematických modelů elektrohydraulických servopohonů se používá analytické identifikace. Toto matematicko-fyzikální modelování využívá fyzikální děje, jimiž je popsán reálný prvek. Důsledný matematický popis složitějších systémů by byl díky své členitosti a komplikovanosti obtížně řešitelný. Jednalo by se o diferenciální rovnici vysokého řádu, jejíž řešení by bylo nesnadné. Proto se zavádí určité zjednodušující předpoklady, které zjednoduší celý model.

Zde je ovšem potřeba se zamyslet. Přílišné zjednodušení by vedlo k nepřesnostem v modelu, který by již věrně nenahrazoval reálný systém. Zde platí, že čím více použijeme zjednodušení, tím méně bude model přesný. Je potřeba najít kompromis mezi dostatečnou přesností modelu a jeho složitostí.

Sestavení matematického modelu nejčastěji vede na Cauchyovu úlohu. To je úloha, při níž hledáme řešení diferenciální rovnice se zadanými počátečními podmínkami. Řešením Cauchyovy úlohy získáme výsledné chování matematicky popsaného systému. Problematika modelování a identifikace systémů je podrobně popsána v [Noskiewič, 1999]. Z této knihy jsou taktéž použity všechny modely.

Výsledný model je pro potřeby HiL simulace nutno upravit o vstupní a výstupní bloky, které zajišťují komunikaci s okolím. Výsledné schéma je zobrazeno na obrázku 3.



Obrázek 3 Schéma modelu elektrohydraulického servopohonu v programu Matlab-SIMULINK

3.3 Úprava stávajícího modelu

Podrobněji bude popsáno vytvoření matematického modelu přímočarého hydromotoru s oboustrannou pístnicí. Použitý model [Noskievič, 1999] je univerzální. Dá se použít pro hydromotor s oboustrannou i jednostrannou pístnicí. Přičemž hydromotor s jednostrannou pístnicí se vytvoří jednoduše položením parametru $d_A=0$. Tento parametr představuje průměr pístnice na straně A hydromotoru (vlevo). Jelikož na této straně pístnice není, je průměr nulový.

Model je vytvořen na základě pohybové rovnice (1) se zanedbáním třecí síly a rovnic průtoků do obou pracovních prostorů hydromotoru (2) a (3)

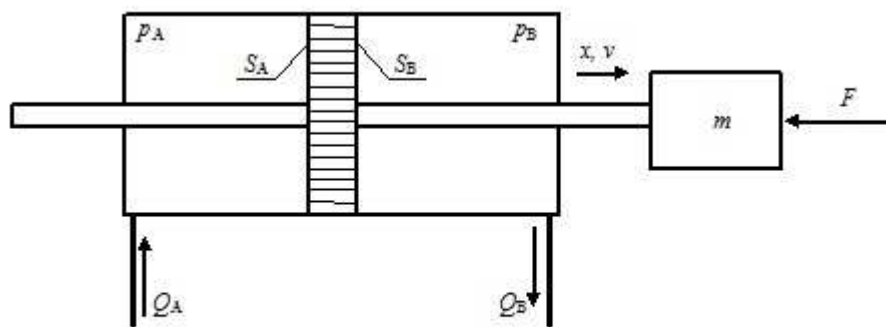
$$m\ddot{x} + b\dot{x} + S_B \cdot p_B + F = S_A \cdot p_A \quad (1)$$

$$Q_A = C_A \cdot \frac{dp_A}{dt} + Q_L + S_A \cdot v \quad (2)$$

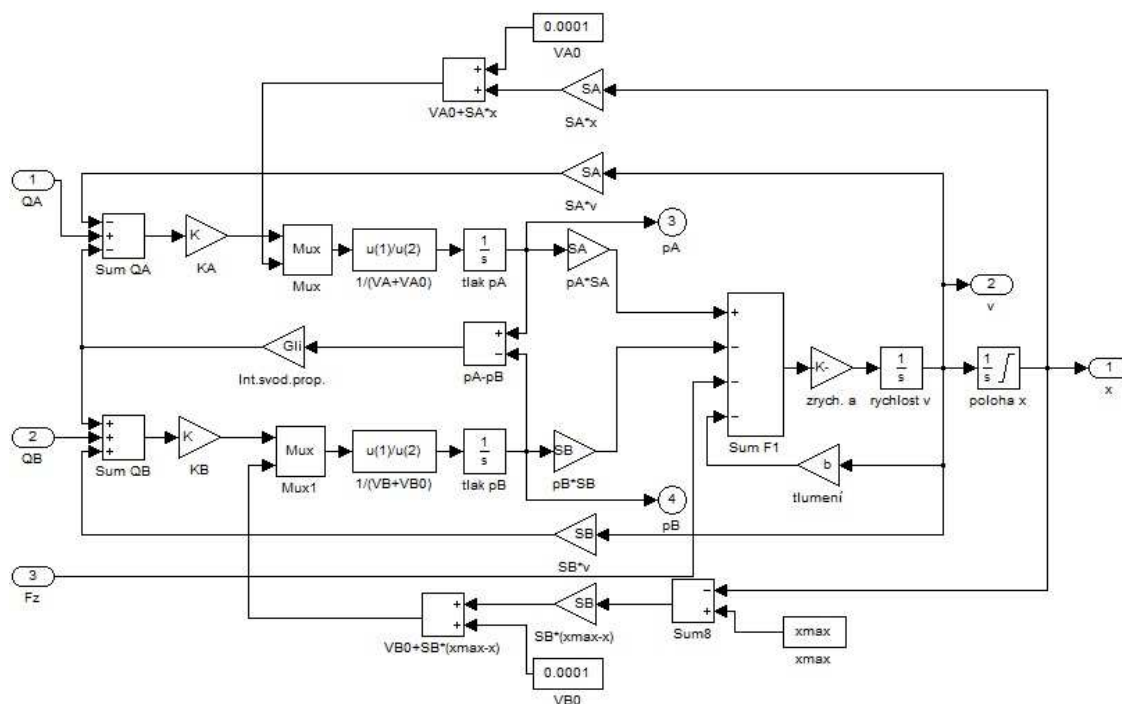
$$Q_B = -C_B \cdot \frac{dp_B}{dt} + Q_L + S_B \cdot v, \quad (3)$$

kde Q_L je průsak z mezi prostory A a B, C_A a C_B jsou hydraulické kapacity prostoru A a B.

Matematické operace jsou v modelu zastoupeny jednotlivými bloky, do nichž vstupují členy pro danou operaci. Takto je vytvořen celý nelineární model. Obrázek 4 ukazuje schéma přímočarého hydromotoru, jeho parametry a obvodové veličiny. Struktura modelu přímočarého hydromotoru je zobrazena na obrázku 5.



Obrázek 4 Přímocárý hydromotor s oboustrannou pístnicí



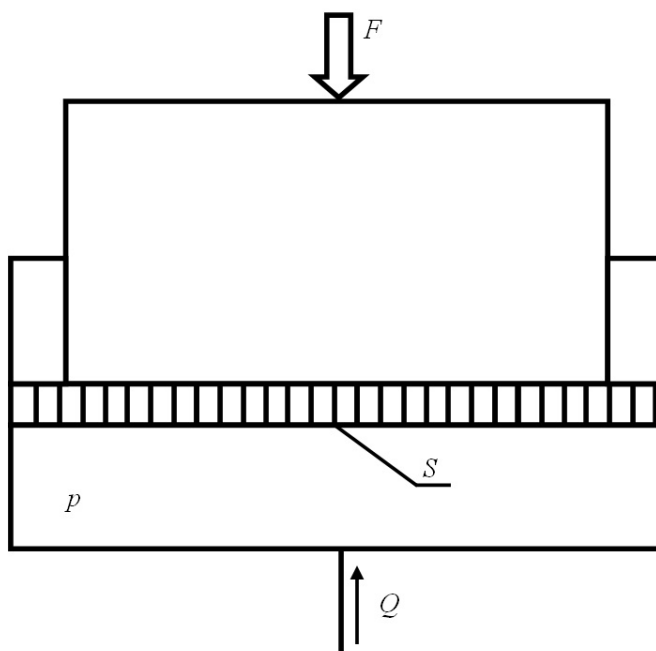
Obrázek 5 Model přímočarého hydromotoru [Noskievič, 1999]

Jednou z popisovaných průmyslových aplikací je elektrohydraulický servopohon válcovací stolice, podrobný popis v kapitole 7. Použit je jednočinný hydromotor s jednostranně vyvedenou pístnicí. Komora na straně pístnice není pod tlakem a slouží

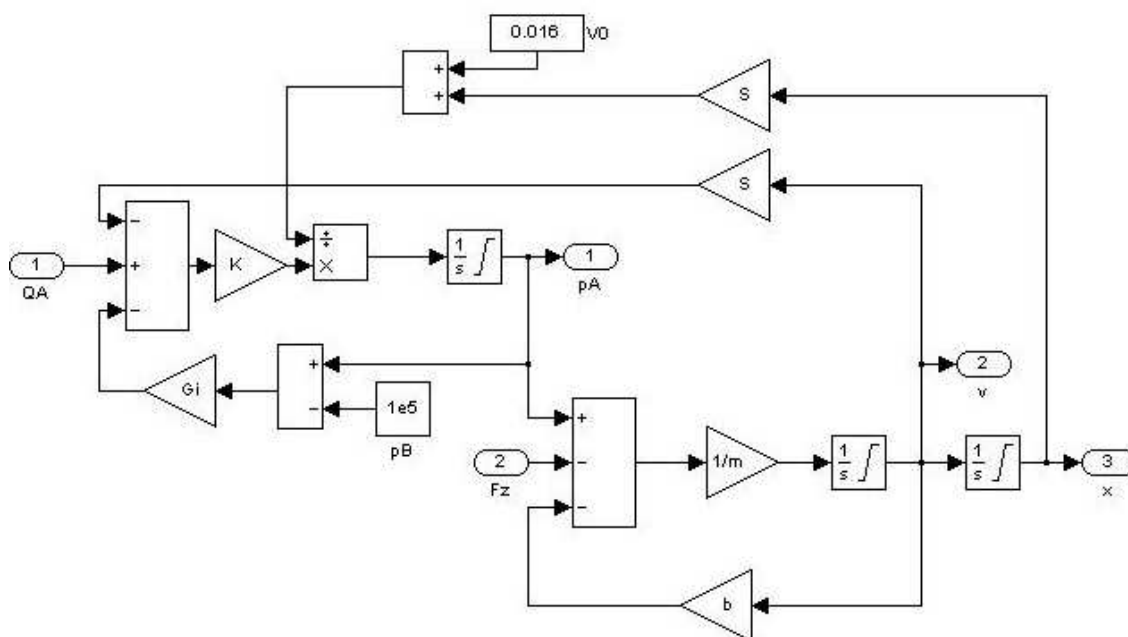
k odvedení průsaků. Zasouvání hydromotoru zajišťuje vnější zátěžná síla. Pohybová rovnice (1) se pak zjednoduší na tvar

$$m.\ddot{x} + b.\dot{x} + F = S.p. \quad (4)$$

Rovnici (3) není třeba uvažovat. Hydromotor je zobrazen na obrázku 6. Model sestavený z rovnic (4) a (2) je zobrazen na obrázku 7.

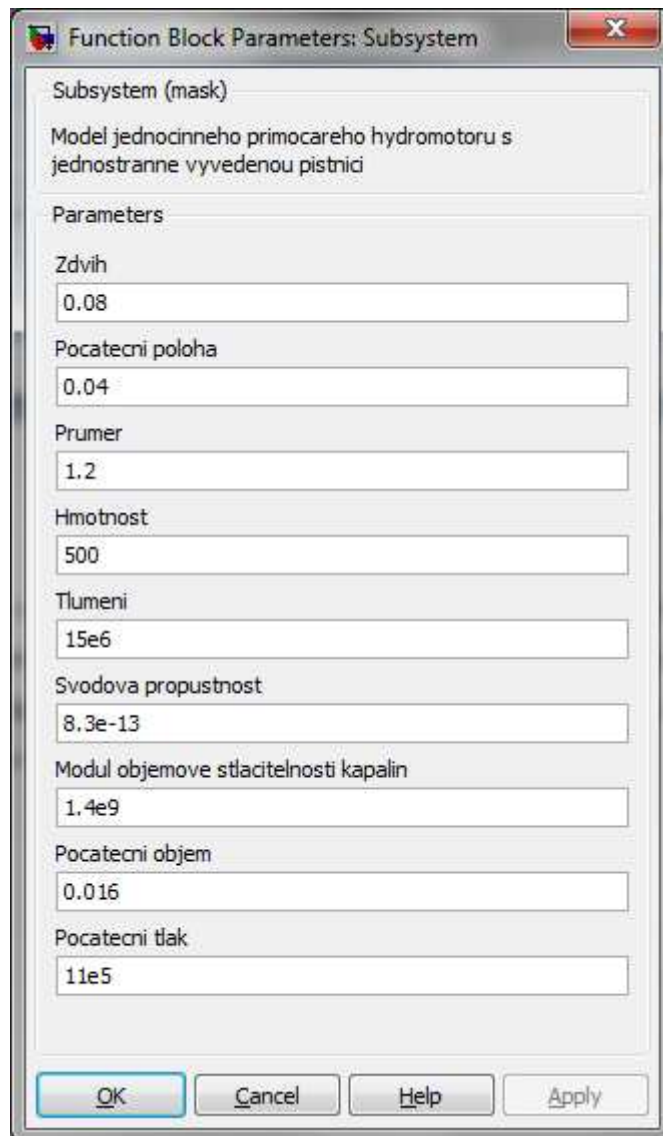


Obrázek 6 Přímočarý jednočinný hydromotor s jednostrannou pístnicí



Obrázek 7 Model přímočarého jednočinného hydromotoru s jednostrannou pístnicí

Schématu z obrázku 7 je poté v programu Matlab-SIMULINK přiřazena maska. Model hydromotoru pak vypadá jako jeden celistvý blok, do něhož vstupuje průtok a zátěžná síla, vystupuje z něj rychlost a poloha hydromotoru. Vlastnosti hydromotoru jsou zobrazeny na obrázku 8.



Function Block Parameters: Subsystem

Subsystem (mask)

Model jednocinného primocareho hydromotoru s jednostranne vyvedenou pistnici

Parameters

Zdvih
0.08

Pocatecni poloha
0.04

Prumer
1.2

Hmotnost
500

Tlumeni
15e6

Svodova propustnost
8.3e-13

Modul objemove stlacitelnosti kapalin
1.4e9

Pocatecni objem
0.016

Pocatecni tlak
11e5

OK Cancel Help Apply

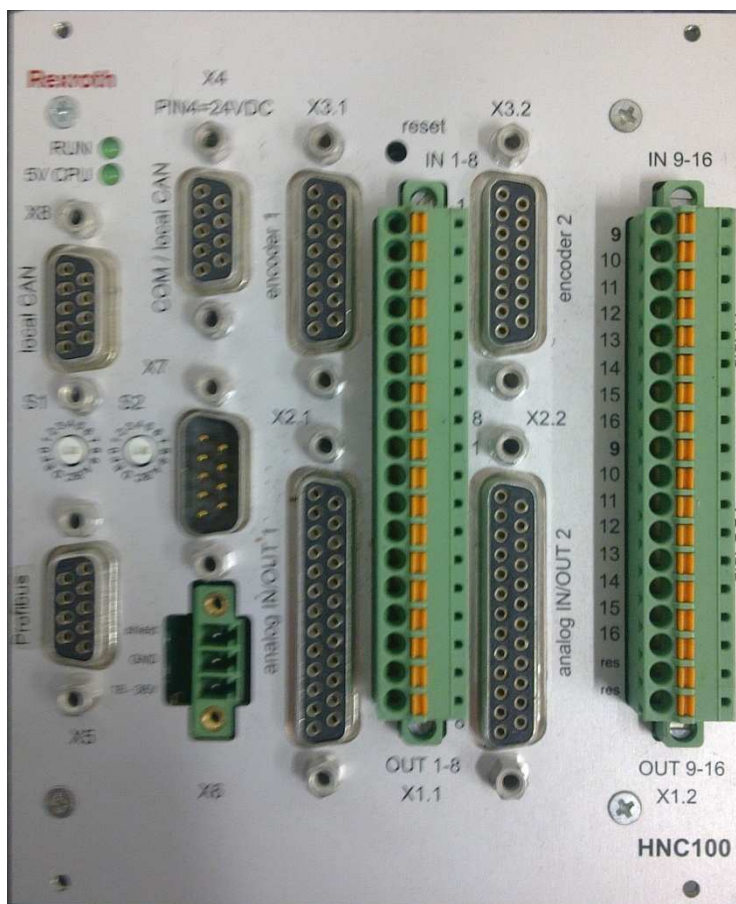
Obrázek 8 Parametry hydromotoru

4 Číslicový řídicí systém HNC100

Řídicí systém použitý v bakalářské práci je HNC100 firmy Bosch Rexroth AG. Níže jsou popsány jeho vlastnosti a je nastíněn postup pro výběr jednoho z řídicích algoritmů, které jsou v tomto průmyslovém regulátoru k dispozici.

4.1 Popis řídicího systému HNC100

Číslicový řídicí systém HNC100 je průmyslový regulátor určený v první řadě k řízení hydraulických pohonů (HNC = Hydraulic Numeric Control). Použitelný je i pro řízení pohonů elektromechanických, nebo pneumatických. Je vyráběn pro použití v těžkých průmyslových podmínkách, čemuž odpovídá schopnost odolávat poruchám, mechanická odolnost vůči vibracím a otřesům a odolnost vůči okolnímu prostředí. Výrobce udává použití ve strojích pro výrobu plastů, obráběcích, lisovacích, dopravníkových, dřevozpracujících strojích apod. Čelní panel řídicího systému HNC100 je zobrazen na obrázku 9.



Obrázek 9 Čelní panel řídicího systému HNC100

K dispozici je systém s přesným typovým označením VT-HNC100-2-21/W-16-P-0. Jednotlivé znaky mají následující význam:

2 - řízení dvou os

21 - výrobní série

W - provedení pro připevnění ke zdi

16 - digitálních vstupů/výstupů

P - obsahuje komunikační sběrnici Profibus DP

0 - neobsahuje vyhodnocovací elektroniku

Řídicí systém HNC100 disponuje řadou funkcí. Je možno vybrat si mezi regulací polohovou, rychlostní nebo tlakovou/silovou. K řízení slouží PIDT1 regulátor (proporcionálně integračně derivační regulátor se setrvačností prvního řádu). Člen T1 je setrvačnost prvního řádu, který zastupuje filtr typu dolní propust. Má přenos

$$G(s) = \frac{1}{T \cdot s + 1} \quad (5)$$

a přímo do regulátoru je zařazen z praktických zkušeností výrobce při řízení celku servoventil-hydromotor.

K propojení s počítačem a naprogramování slouží sériová linka RS232. Dále je na řídicím systému vstup pro napájecí kabel vystupující z transformátoru, který síťové napětí převádí na napětí 24V, proud 2,7A a výkon zaokrouhlený na 65W. K dispozici máme dále 2 analogové konektory obsahující celkem 4 analogové vstupy a stejný počet výstupů. Vstupy mohou být buď bipolární, nebo unipolární. Vedle analogových můžeme použít také digitální vstupy a výstupy, těch je dohromady 32 (16 vstupů, 16 výstupů). Nechybí samozřejmě také konektory pro připojení inkrementálních snímačů nebo snímačů SSI. Pro komunikaci s nadřazeným systémem lze použít rozhraní Profibus DP, CANopen, Interbus-S nebo Sercos. Řídicí systém má tedy dostatek možností k připojení snímačů, akčních veličin pro řídicí prvky, propojení s nadřazeným systémem i připojení k počítači.

4.2 Algoritmy řízení pro realizaci elektrohydraulických servopohonů

Pro elektrohydraulické servopohony lze použít různé algoritmy řízení. Jejich výběr nejvíce závisí na geometrických rozměrech přímočarého hydromotoru. Ty totiž ovlivňují jeho vlastní frekvenci. Přímocharý hydromotor je obecně prvek s velmi nízkým tlumením, servoventil má naopak tlumení vysoké. Dynamiku servoventilu i dynamiku hydromotoru modelujeme jako proporcionální člen se setrvačností druhého řádu. Přenosy dynamických členů mají tvar

$$G_{SV}(s) = \frac{K_{SV} \cdot K_Q}{T_{SV}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_{SV} \cdot T_{SV} \cdot s + 1} \quad (6)$$

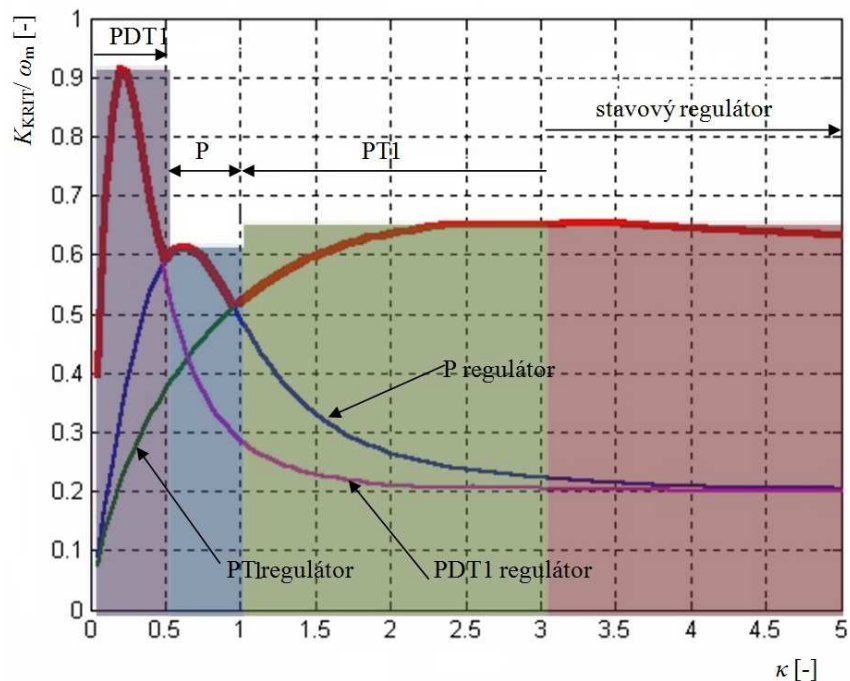
$$G_{HM}(s) = \frac{K_{HM}}{T_{HM}^2 \cdot s^2 + 2 \cdot \xi_{HM} \cdot T_{HM} \cdot s + 1}. \quad (7)$$

Nastavení kritického zesílení je kritériem pro volbu regulátoru [Noskievič, 2001].

Označíme-li poměr vlastních frekvencí servoventilu a hydromotoru jako součinitel κ

$$\kappa = \frac{f_{SV}}{f_{HM}} = \frac{T_{HM}}{T_{SV}}, \quad (8)$$

a vynesu závislost kritického zesílení normovaného na vlastní frekvenci $K_{KRIT}/(\omega_m)$ na součiniteli κ , dostaneme závislost na obrázku 10.



Obrázek 10 Závislost kritického zesílení na součiniteli κ [Noskievič, 2001]

Podle velikosti součinitele κ určíme řídicí algoritmus a odečteme velikost $K_{\text{KRIT}}/(\omega_m)$. Hodnotu kritického zesílení regulátoru zjistíme z vzorce (9), ostatní parametry jsou vypsány v tabulce 1.

$$K_{\text{Rkrit}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{HM}} \cdot \left(\frac{K_{\text{krit}}}{\omega_m} \right) \cdot \frac{1}{K_O \cdot K_{\text{sn}}}, \quad (9)$$

kde K_O je zesílení otevřeného regulačního obvodu a K_{sn} je zesílení snímače. Zesílení otevřeného regulačního obvodu se určí ze vzorce

$$K_O = K_{\text{Qx}} \cdot K_{\text{SV}} \cdot K_{\text{HM}}. \quad (10)$$

Ve vzorci (10) je K_{Qx} průtokové zesílení servoventilu, K_{SV} zesílení servoventilu a K_{HM} zesílení hydromotoru. Jednotlivá zesílení se určí podle vztahů

$$K_{\text{Qx}} = \frac{Q_{\text{SVmax}}}{x_{\text{SVmax}}} \quad (11)$$

$$K_{\text{SV}} = \frac{x_{\text{SVmax}}}{U_{\text{SVmax}}} \quad (12)$$

$$K_{\text{HM}} = \frac{x_{\text{max}}}{Q_{\text{max}}}. \quad (13)$$

Typ regulátoru	Přenos G (s)	Činitel κ
PDT1	$K_R \cdot \frac{T_D s + 1}{T_S + 1}, \quad T_D = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot f_{\text{SV}}}, \quad T = 0,1 T_D$	$\kappa = 0 \div 0,5$
P	K_R	$\kappa = 0,5 \div 1$
PT1	$K_R \cdot \frac{1}{T_S + 1}, \quad T = \frac{1}{\pi \cdot f_{\text{HM}}}$	$\kappa = 1 \div 3$
Stavové řízení	$u = sW - r^T x$	$\kappa \geq 3$

Tabulka 1 Parametry regulátoru pro různé algoritmy řízení [Noskievič, 2001]

Všechny hodnoty nutné pro výpočet zesílení (11) ÷ (13) byly určeny experimentálně v programu Matlab-SIMULINK

5 Propojení osobního PC s HNC100 za účelem HiL simulace

Hardware in the Loop simulace je realizována na osobním počítači, na němž je v programu Matlab-SIMULINK spuštěn model elektrohydraulického servopohonu. Komunikaci s okolním prostředím a chod v reálném čase zajišťuje knihovna Real-Time Windows Target programu Matlab. Převod analogových dat na číslicová a naopak provádí multifunkční měřicí karta. Ta je spojena s konektorovým blokem, k němuž je pomocí koaxiálních kabelů připojen řídicí systém. Komunikace s řídicím systémem je možná přes program Win-Ped dodávaný výrobcem řídicího systému. K počítači, na kterém je spuštěn program Win-Ped, je řídicí systém připojen přes sériovou linku RS232.

5.1 Multifunkční měřicí karta DAQCard-6036E

DAQCard-6036E je multifunkční měřicí karta do PCMCIA slotu od firmy National Instruments zobrazená na obrázku 11.



Obrázek 11 Multifunkční měřicí karta DAQCard-6036E




K této kartě je pomocí kabelu SHC-68-68-EP (obrázek 12) připojen stíněný konektorový blok BNC-2110 (obrázek 13), na který jsou zapojeny veškeré vstupy a výstupy. Konektorový blok umožňuje připojení 8 analogových vstupů (unipolárních – single-ended, nebo bipolárních - differential) a 2 analogové výstupy. K převodu je použit 16 bitový převodník se vzorkovací frekvencí $20\text{ kS}\cdot\text{s}^{-1}$ pro vstupy a $1\text{ kS}\cdot\text{s}^{-1}$ pro výstupy. Dále je možno připojit 8 digitálních vstupů a výstupů. Karta rovněž obsahuje 24 bitový čítač. Ke kartě je dodáván ovladač, který po nainstalování zpřístupní měřicí kartu osobnímu počítači.

**Obrázek 12** Propojovací kabel SHC-68-68EP**Obrázek 13** Stíněný konektorový blok BNC-2110

5.2 Real-Time Windows Target Toolbox

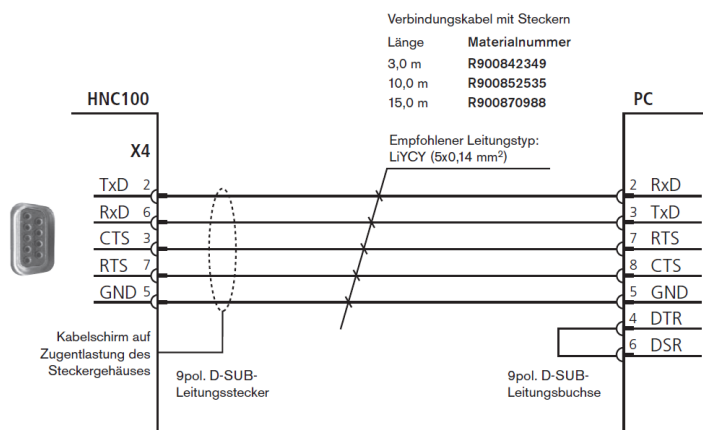
Tato knihovna je určena pro práci s externími analogovými i číslicovými daty a je nutná pro spuštění modelu vytvořeného v SIMULINKu na platformě Windows v reálném čase. Nainstaluje se zapsáním příkazu „rtwintgt- setup“ v hlavním okně Matlabu. Poté již v SIMULINKu lze do modelu vložit bloky analog/digital input/output. V nich se vybere příslušná měřicí karta, kterou Matlab díky nainstalovanému ovladači rozpozná, a nastaví se vzorkovací perioda.

Pro správnou komunikaci s řídicím systémem se musí provést následující nastavení. V okně SIMULINKu je napravo od okna s délkou simulace okno, v kterém je nastavena hodnota Normal. Ta se musí nastavit na hodnotu External, aby Matlab věděl, že bude pracovat s externími daty. V nastavení simulace (Simulation→ Configuration Parameters...) na záložce Real-Time Workshop je nutno nastavit cílový systémový soubor (System target file) na Real-Time Workshop. Důležitým parametrem, který je nutno uvážit je krok simulace (step size). Jeho velikost volíme s ohledem na dostatečný počet vzorků pro simulaci v reálném čase a zároveň s ohledem na systémové nároky zpracování dat v reálném čase. V bakalářské práci byla výhradně používána vzorkovací frekvence 500Hz, neboli vzorkovací perioda 2ms. Vzhledem k vybrané vzorkovací frekvenci je důležité nastavit odpovídající počet zaznamenávaných vzorků. Toto nastavení se provádí v nástrojích (Tools→ External Mode Control Panel), kde vybereme možnost signály a spouštění (Signal & Triggering). Minimální hodnota pro frekvenci 500Hz a dobu trvání 10s je $10 \cdot 500 = 5000$.

Po sestavení modelu doplněného o externí vstupy se model musí přeložit  (Incremental build). Poté se provede propojení s externím zařízením  (Connect To Target). Nyní je Matlab ve stavu, kdy je propojen s měřicí kartou a čeká na pokyn k zahájení simulace. Ten se mu dá standardně stiskem tlačítka s ikonkou černého trojúhelníku  (Start simulation).

5.3 Propojení PC a HNC100

Řídicí počítač, na kterém je spuštěn program Win-Ped, je s řídicím systémem HNC-100 propojen kříženým sériovým kabelem. Zapojení jednotlivých pinů je na obrázku 14. Správné propojení je nezbytné k tomu, aby program Win-Ped rozpoznal zařízení připojené na některém ze sériových portů počítače.



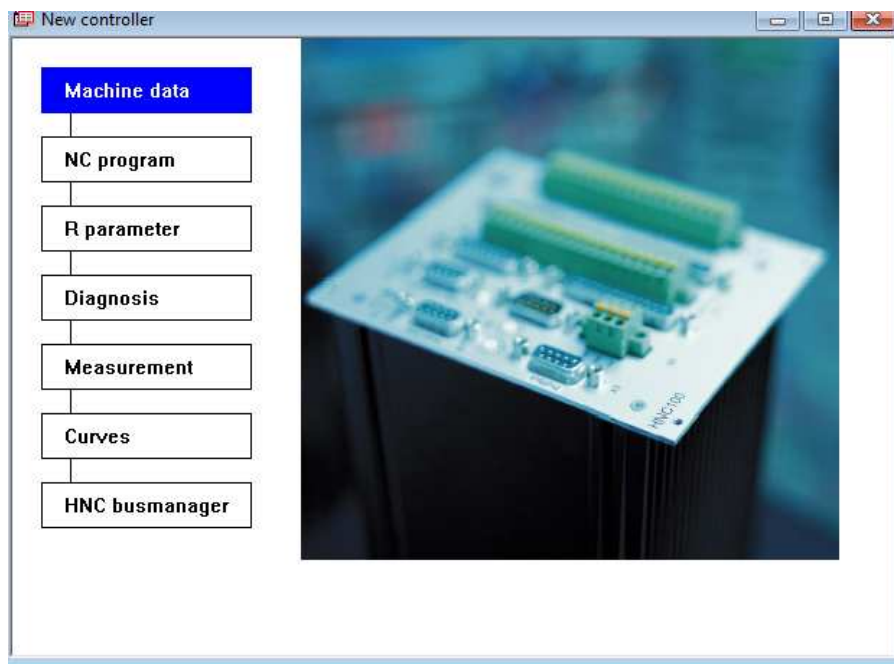
Obrázek 14 Zapojení sériového kabelu ke komunikaci mezi HNC100 a počítačem [Bosch Rexroth, AG, 2007b]

5.4 Program Win-Ped

Program Win-Ped je prostředkem, pomocí kterého komunikujeme s řídicím systémem HNC100. Obsahuje tedy široké možnosti nastavení a příkazů rovnající se schopnostem samotného regulátoru. Navíc přidává možnost sledování stavových veličin, jejich ukládání, vykreslení do grafu, ochranu projektu heslem a mnohé další.

Při vytváření nového projektu si program otestuje přítomnost zařízení na sériových portech počítače pomocí položky načíst data (Fetch data) z menu komunikace (Communication). Informace o nalezeném zařízení (označení – název, výrobní řada)

jsou načteny do vytvářeného projektu, který je možno uložit pod vybraným jménem do zvolené složky.



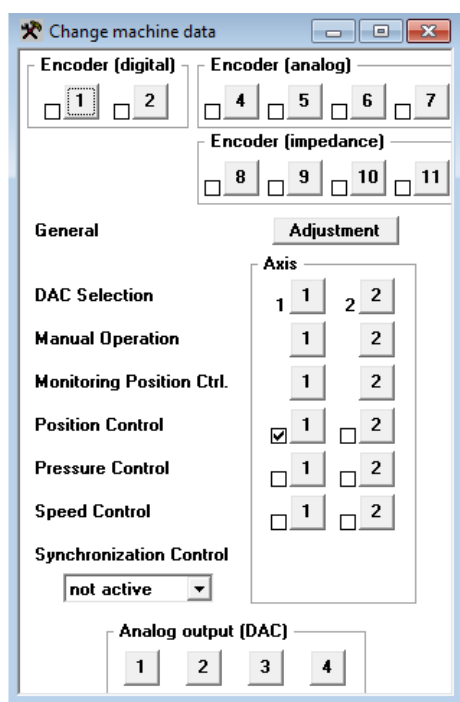
Obrázek 15 Položky konkrétního projektu

Obrázek 15 ukazuje všechny položky z menu pro konkrétní projekt, jehož jméno bude místo názvu New controller na obrázku 15. V první položce, **data stroje (Machine data)**, se provádí nastavení. Nastavit je potřeba vstup, na který je přivedena zpětná vazba, vzorkovací frekvenci, typ regulátoru (nastavení jeho parametrů), typ synchronizace (v případě řízení dvou hydromotorů) a typ výstupního signálu. Druhá položka, **NC program**, slouží k samotnému zadávání příkazů pro řídicí systém. Příkazy jsou zadávány v G-kódu. Po napsání programu se provede jeho překlad a kontrola syntaxe. Třetí položkou jsou **R parametry**. Ty umožňují měnit v režimu online hodnoty parametrů příkazů. Tak např. místo požadované polohy 100mm se do programu zapíše R200. Nyní je R parametrem 200 zastoupena požadovaná poloha, kterou tímto můžu kdykoli měnit. Struktura příkazu zůstane stejná, mění se jen hodnota jeho parametru. Každému R parametru lze přidělit název, počáteční hodnotu a meze (maximální a minimální hodnotu). Další položka, **diagnostika**, má dva účely. Pomocí ní lze ručně povolovat a zakazovat jednotlivé výstupy. Za druhé plní funkci průběžného zobrazování měřených hodnot. Lze zobrazovat aktuální hodnotu na A/D a D/A převodnících, aktuální hodnotu prováděných příkazů, chybu regulace apod. Položka **měření (Measurement)** slouží k zobrazení naměřených dat. Před spuštěním měření je nutno

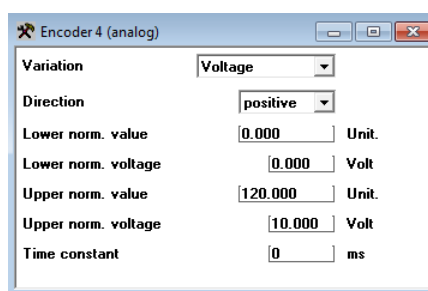
vybrat veličiny, které se mají měřit (maximálně však 4 najednou), dále časovou základnu, která určuje, kolik vzorků v závislosti na vzorkovací periodě bude zpracováno (pokud se rovná 1, tak všechny; pokud se rovná 2, tak každý druhý vzorek atp.). Nakonec se musí správně nastavit spouštěcí úroveň (Trigger). Položka **křivky** (Curves) umožňuje definovat závislost mezi vstupem a výstupem pomocí zadané křivky. Poslední položka, **HNC sběrniceový manažer** (HNC busmanager), slouží k vytvoření tabulek, ve kterých lze definovat, jaká data mají být vyměňována prostřednictvím příslušné sběrnice.

5.5 Nastavení vstupů/výstupů a regulátoru

Nastavování vstupů/výstupů a regulátoru se provádí v datech stroje (Machine data). Toto okno má vzhled patrný z obrázku 16, na obrázku 17 jsou vidět parametry pro určitý vstup.



Obrázek 16 Nastavení dat stroje



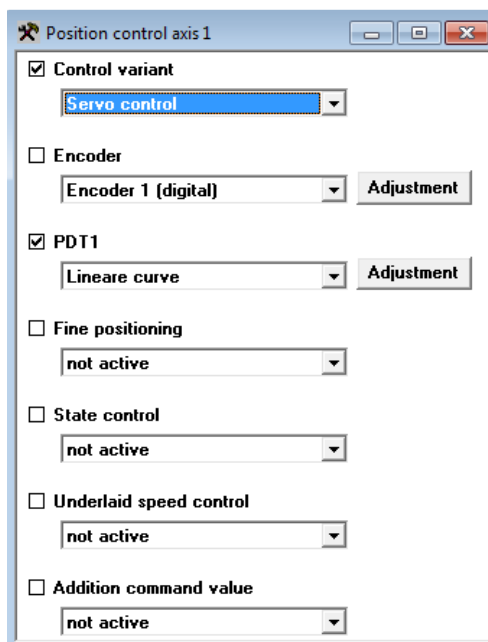
Obrázek 17 Nastavení vstupu

Vstupní signál (nejčastěji zpětnovazební měřená veličina) se nastavuje kliknutím na číslo od 4 do 7 v části Encoder (analog). Po klepnutí na číslo konkrétního vstupu se zobrazí nabídka (obrázek 17), v které nastavíme, zda se jedná o vstup proudový či napěťový a rozsah (např. minimální hodnota=0, což odpovídá minimálnímu napětí 0V,

maximální hodnota =120[fyzikálních jednotek, např. mm], což odpovídá 10V). Jako poslední je v této části možnost nastavit časovou konstantu, která představuje digitální filtr typu dolní propust pro analogový vstupní signál.

Stiskem tlačítka nastavení (Adjustment) na řádku hlavní (General) máme možnost nastavit základní čas vzorkování (samozřejmě čím nižší nastavená hodnota, tím větší přesnost, ovšem na druhou stranu vyšší nároky na procesor).

Dále bude popsáno nastavení pro polohové řízení. Po stisku jedničky (1. osa) u řádku řízení polohy (Position Control) se zobrazí okno, které vidíme na obrázku 18. Ve variantě řízení (Control variant) je k dispozici vybrané servo řízení (Servo control), nebo tzv. řízení polohy v závislost na brzdění (Position depending braking). U této regulace se až do fáze zpomalování pracuje v otevřeném regulačním obvodu. Samotné zpomalení je však již řízeno v uzavřené zpětnovazební smyčce.



Obrázek 18 Nastavení parametrů pro polohové řízení

Vysvětleno bude nastavení polohového řízení, které bude zajišťovat PDT1 (proporcionálně derivační regulátor se setrvačností prvního řádu) regulátor. U polohového řízení musí být v položce Encoder vybrán vstup regulátoru, na který je přiveden signál od zpětné vazby [např. Encoder 4 (analog)]. U PDT1 regulátoru je možnost použít tzv. křivku korekce. Ta slouží ke kompenzaci nelineární průtokové charakteristiky ventilů a je účinná pouze u polohového řízení. K dispozici jsou tyto křivky: lineární křivka (linear curve), křivka se sklonem (inflected curve), lineární

křivka s korekcí ve tvaru odmocniny (linear curve with root-shaped correction), lineární křivka s korekcí ve tvaru sinusovky (linear curve with sinusoidal correction). Po kliknutí na nastavení (Adjustment) definujeme velikost časové konstanty, D složky regulátoru (obě v ms), P složky regulátoru (jednotka je V/jednotka, jednotka je definována v nastavení vstupu – minimální a maximální hodnota) a nakonec tzv. nastavení dopředu/dozadu, které představuje rozdílné hydraulické zesílení, jako je například rozdílná plocha pístnic v hydraulickém válci. Toto nastavení je opět účinné pouze pro PDT1 regulátor s lineární korekční křivkou. Touto hodnotou je při přechodu v negativním směru násobena výstupní hodnota.

5.6 Programování HNC100

Programování se provádí v části NC program pomocí G-příkazů. Zde je popis těch základních používaných:

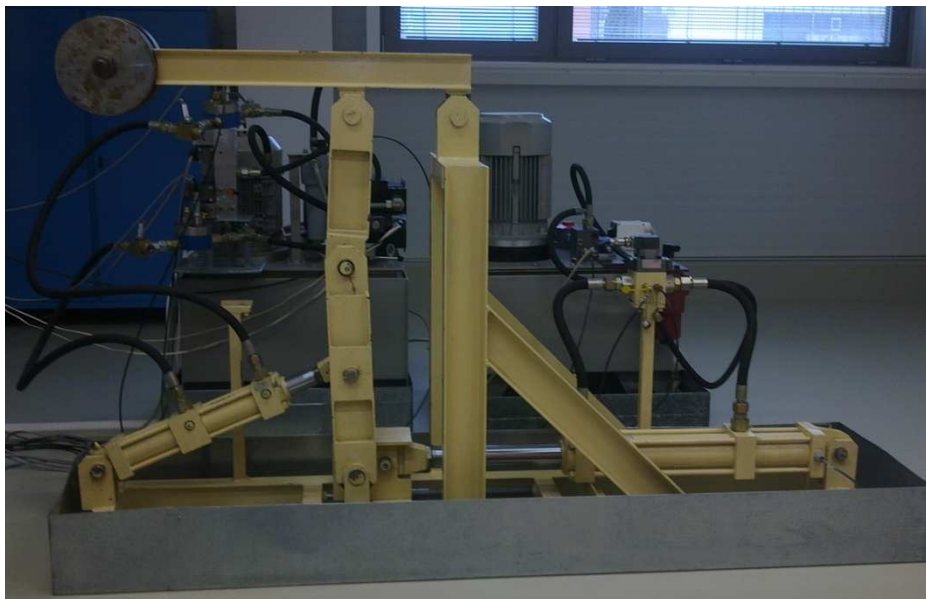
- **G01.** Syntaxe tohoto příkazu je následující: *G01 X<žádaná poloha> I<zrychlení> J<brzdění> F<pojezdová rychlost> <zbytková rychlost>*. Je to tedy příkaz pro přesun z aktuální pozice na žádanou a to za definované rychlosti i zrychlení. Jakmile je dosaženo žádané hodnoty, pokračuje se v pohybu zbytkovou rychlostí (Residual velocity).
- **G30.** Syntaxe je stejná jako u příkazu G01. Rozdíl je v tom, že příkaz G30 je ukončen poté, co žádaná hodnota dosáhne hodnoty v příkazu za písmenem X (žádaná poloha). Je to příkaz vhodný pro opakované pohyby, které vyžadují rychlou změnu směru, aniž by se čekalo, až skutečná poloha dosáhne polohy žádané.
- **G25.** Tento příkaz má syntaxi následující: *G25 X<žádaná poloha> <poloha změny> F<pojezdová rychlost> {S<otevření ventilu> / E}*. G25 je příkaz, který vykonává zadanou rychlostí pohyb do zadané polohy, avšak při dosažení polohy změny je deaktivováno řízení v uzavřené zpětnovazební smyčce, přechází se do řízení v otevřené smyčce a ventil je buď otevřen na hodnotu otevření ventilu (hodnota za písmenem S), nebo na něm zůstává napětí rovné hodnotě při dosažení polohy změny (tedy poslední hodnota). Otevření ventilu se udává v procentuální podobě, kdy 100% odpovídá 10V.

- **G26.** Syntaxe je podobná syntaxi G25 příkazu, chybí však poslední část: *G26 X<žádaná poloha> <poloha změny> F<pojezdová rychlost>*. Rozdíl oproti příkazu G25 je ten, že i po dosažení polohy změny je řízení stále v uzavřené zpětnovazební smyčce.
- **G04.** Syntaxe tohoto příkazu je velmi jednoduchá: *G04 F<čas prodlevy>*. Jedná se tedy o příkaz, pomocí kterého do NC programu zavádíme čekací dobu. Další příkaz bude vykonán až po uplynutí této doby (zadané v s).

Po napsání programu je nutné jej zkontrolovat a přeložit (Check and compile) z menu funkce (Functions) a definovat R-parametry. Uživatel má možnost psát jak hlavní program (Main program), tak podprogram (Subroutine). Hlavní program musí být ukončen návěštím M02, podprogram návěštím M17. Do podprogramu píšeme ty části programu, které často používáme. Poté se na ně pouze odvoláme a nemusíme je v hlavním programu neustále opisovat.

6 Elektrohydraulický výukový stend

První popisovanou průmyslovou aplikací je elektrohydraulický servopohon výukového stendu katedry Automatizační techniky a řízení VŠB-TU Ostrava momentálně umístěný v laboratoři C107 v budově Centra pokročilých inovačních technologií (CPIT). Stend je vybaven dvěma hydraulickými agregáty, dvěma přímočarými hydromotory a ventily pro jejich ovládání. Zátěžný mechanismus prvního hydromotoru je specifický tím, že zátěž působí do poloviny zdvihu tlakově a v druhé polovině zdvihu tahově. Druhý hydromotor je umístěn ve vodorovné poloze. Na stendu je možnost testovat různé algoritmy řízení, měnit lze i zátěž prvního hydromotoru. Jednotlivé hydromotory jsou vybaveny snímači polohy, první hydromotor i snímačem zrychlení. Dále je v hydraulickém obvodu umístěn snímač systémového tlaku. Tlak je měřen i v obou komorách hydromotorů. Konstrukce stendu je zobrazena na obrázku 19. Řízený hydromotor je v levé spodní části obrázku.



Obrázek 19 Elektrohydraulický výukový stend

6.1 Parametry modelu

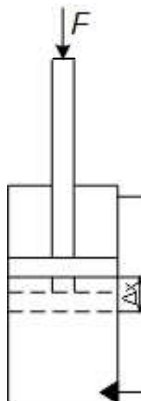
Výukový stend již byl použit pro řadu úloh a měření, proto je většina parametrů potřebných do modelu známa. Určit je potřeba pouze vlastní frekvenci hydromotoru.

Výchozím vztahem pro určení vlastní frekvence hydromotoru bude vzoreček (14) popisující stlačitelnost pracovní kapaliny – oleje.

$$\Delta V = S \cdot \Delta x \quad (14)$$

Dále použiji vzorec (15) popisující změnu tlaku v kapalině

$$\Delta p = K \cdot \frac{\Delta V}{V} \quad (15)$$



Obrázek 20 Stlačení oleje vlivem vnější síly

Sloučením vzorců (14) a (15) a následnými úpravami získám vztah pro tzv. hydraulickou tuhost, vzorec (16).

$$\begin{aligned}\Delta p &= K \cdot \frac{S \cdot \Delta x}{V} \\ \Delta p \cdot S &= K \cdot \frac{S^2 \cdot \Delta x}{V} \\ F &= k_H \cdot \Delta x \\ k_H &= \frac{K \cdot S^2}{V}\end{aligned}\tag{16}$$

Přímočarý hydromotor si lze představit jako paralelní řazení dvou pružin, olejového sloupce na straně pístu (1. pružina) a olejového sloupce na straně mezikruží (2. pružina). Celková hydraulická tuhost hydromotoru je dána součtem hydraulických tuhostí olejových sloupců v prostoru A i B. Tato celková tuhost je dosazena do rovnice pro vlastní frekvenci pružiny $f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{k}{m}}$ [NOSKIEVIČ, 1999].

$$f_0 = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m} \cdot \left(\frac{S_A^2}{V_A} + \frac{S_B^2}{V_B} \right)}\tag{17}$$

Do rovnice (17) budou nyní dosazeny vztahy pro výpočet objemů V_A a V_B jednotlivých částí hydromotoru

$$V_A = S_A \cdot x + V_{A0}\tag{18}$$

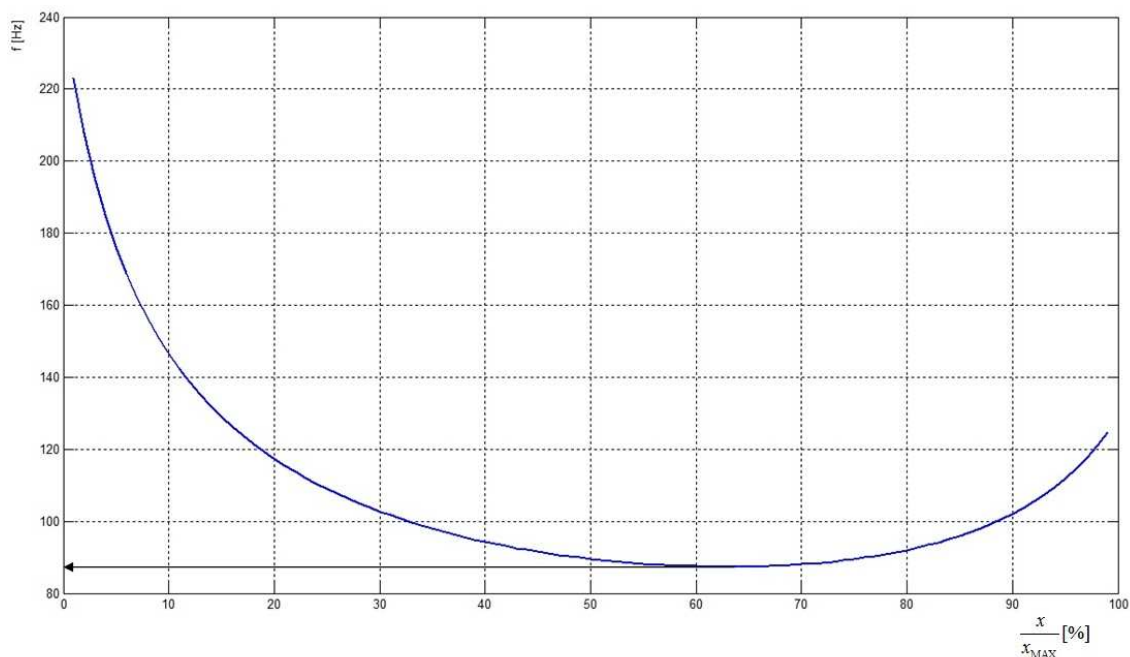
$$V_B = S_B \cdot (x_{\text{MAX}} - x) + V_{B0},\tag{19}$$

kde V_{A0} a V_{B0} jsou objemy kapaliny pod tlakem při nulovém, resp. maximálním zdvihu hydromotoru.

Po dosazení vztahů (18) a (19) do rovnice (17) získáváme konečný vztah pro vlastní frekvenci přímočarého hydromotoru s jednostranně vyvedenou pístnicí

$$f_{\text{HM}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m} \cdot \left(\frac{S_A^2}{S_A \cdot x + V_{A0}} + \frac{S_B^2}{S_B \cdot (x_{\text{MAX}} - x) + V_{B0}} \right)},\tag{20}$$

z kterého je zřejmá závislost vlastní frekvence hydromotoru na jeho zdvihu. Její průběh je zobrazen na obrázku 21.



Obrázek 21 Závislost vlastní frekvence na poměrném zdvihu

Kritickou vlastní frekvencí z pohledu řízení je nejnižší vlastní frekvence. Proto je potřeba nalézt minimum průběhu funkce na obrázku 21. Odečtená vlastní frekvence hydromotoru hydraulického stendu je 87,4Hz. Tabulka 2 shrnuje parametry výukového stendu.

Servoventil		Přímočarý hydromotor	
Vlastní frekvence f_{SV} [Hz]	118	Vlastní frekvence f_{HM} [Hz]	87,4
Tlumení ζ_{SV} [-]	0,9	Zdvih x_{MAX} [m]	0,12
Průtokové zesílení $B_{SV} [\frac{m^3}{s \cdot \sqrt{Pa}}]$	$5,3 \cdot 10^{-7}$	Průměr válce d [m]	0,063
Krytí šoupátka x_{SV0} [-]	-0,001	Průměr pístnice d_B [m]	0,045
Maximální rychlost v_{SVMAX} [s^{-1}]	120	Hmotnost m [kg]	300
		Tlumení $b [\frac{N \cdot s}{m}]$	10000
		Svodová propustnost $G_i [\frac{m^3}{s \cdot Pa}]$	$1 \cdot 10^{-12}$
		Modul objemové stlačitelnosti kapaliny K [Pa]	$1,4 \cdot 10^9$

Tabulka 2 Parametry elektrohydraulického stendu

6.2 Návrh řídicího systému

Kritériem pro určení algoritmu řízení je součinitel κ . Ten je roven

$$\kappa = \frac{f_{SV}}{f_{HM}} = \frac{118}{87,4} = 1,35 \text{ [NOSKIEVIČ, 2001]}. \quad (21)$$

Teorie [NOSKIEVIČ, 2001] říká, že v takovém případě je nejvýhodnější použití tzv PT1 regulátoru (proporcionálního regulátoru se setrvačností prvního řádu). Tento regulátor má přenos ve tvaru

$$G(s) = K_R \cdot \frac{1}{Ts + 1}, \quad (22)$$

kde časová konstanta T je spočtena podle vzorce v tabulce 1

$$T = \frac{1}{\pi \cdot f_{HM}} = \frac{1}{\pi \cdot 87,4} = 3,6 \text{ ms}. \quad (23)$$

V nastavení programu Win-Ped se zesílení nastavuje v jednotkách $\text{V} \cdot \text{jednotka}^{-1}$. To znamená, že je do něj zahrnuto i zesílení snímače. Vzorec (9) tedy zesílení snímače obsahovat nebude

$$K_{Rk_{\text{krit}}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{HM} \cdot \left(\frac{K_{\text{krit}}}{\omega_m} \right) \cdot \frac{1}{K_O} = 2 \cdot \pi \cdot 87,4 \cdot 0,58 \cdot \frac{1}{0,012} = 26,5 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 26,5 \frac{\text{V}}{\text{mm}}. \quad (24)$$

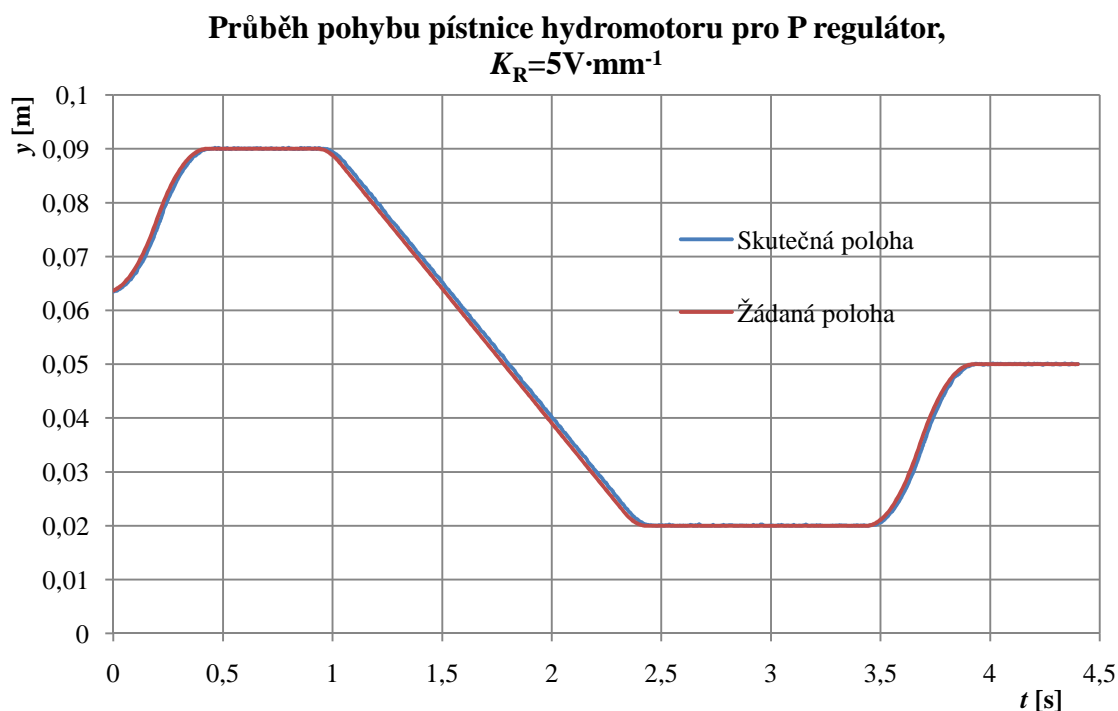
6.3 Ověření navrženého řídicího algoritmu metodou HiL

Navrhnutý řídicí algoritmus byl otestován HiL simulací. Bylo zjištěno, že dostatečné kvality regulace bylo dosaženo i s nejjednodušším regulátorem P (obrázek 22). Zesílení regulátoru bylo $5 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$. Při použití většího zesílení se obvod stává nestabilní a začíná kmitat. Největší chyba sledování byla 2mm. Maximální chyba polohy byla 0,2mm.

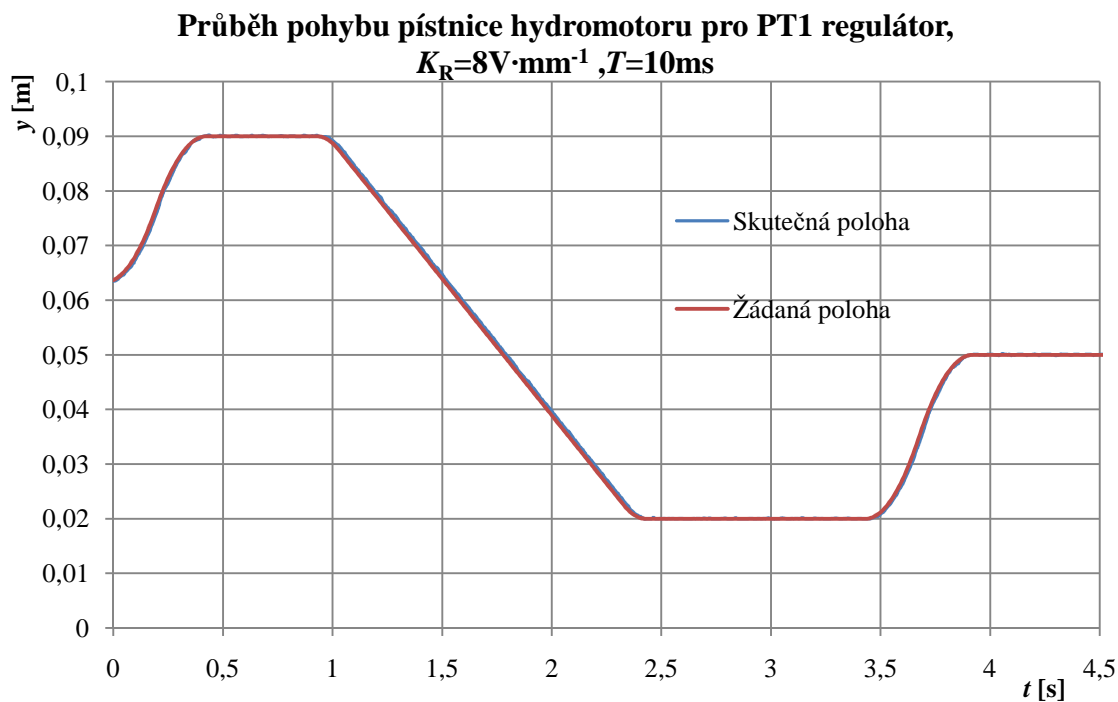
Při použití PT1 regulátoru (obrázek 23) byla ještě zvýšena kvalita regulace. Zesílení bylo zvýšeno na hodnotu $8 \text{ V} \cdot \text{mm}^{-1}$, časová konstanta rovna 10ms. Zvýšeným zesílením se chyba sledování snížila na 1,2mm. Maximální chyba polohy byla menší než 0,2mm.

Výsledky HiL simulace byly porovnány s měřením provedeným na reálném standu a zaneseny do jednoho grafu (obrázek 24). Porovnání bylo provedeno pro P

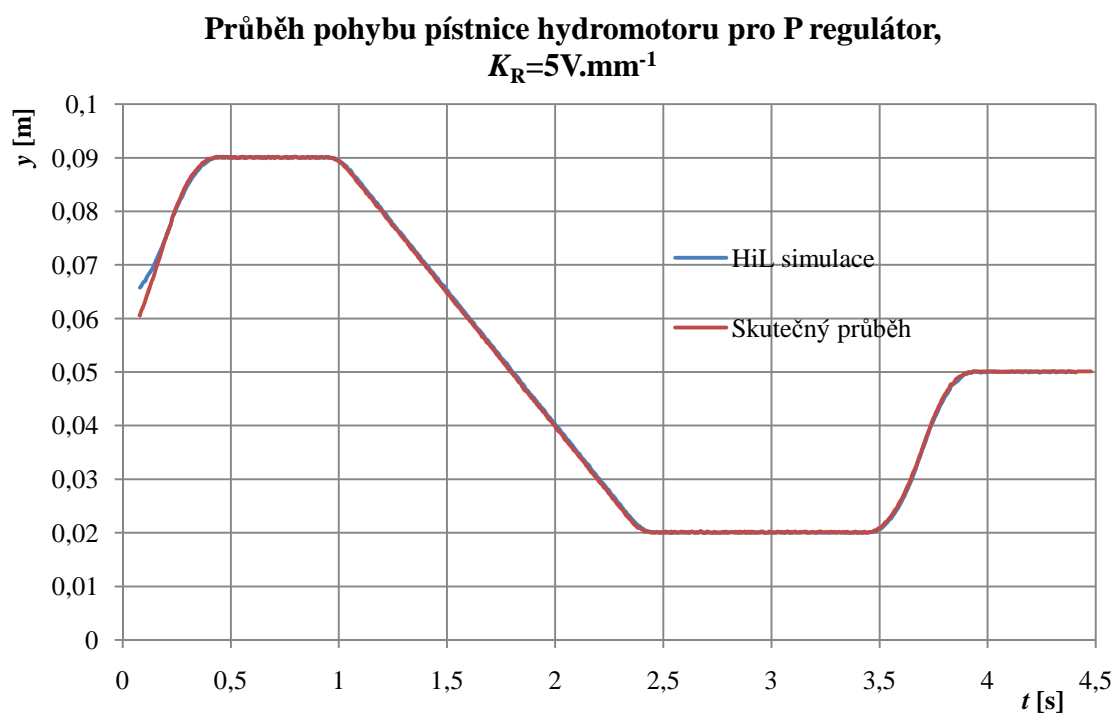
regulátor. Výsledkem jsou dva prakticky identické překrývající se průběhy. Tohoto výsledku bylo dosaženo na základě předchozí verifikace modelu. Tzn., že na skutečném stendu byla změřena rychlost zasouvání a vysouvání hydromotoru. Pro stejný vstupní signál byla zjištěna odezva modelu. Změnou průtokového zesílení servoventilu jsem docílil stejného sklonu průběhu (stejných rychlostí) vysouvání a zasouvání. Tímto postupem byla provedena tzv. verifikace. Model je pak věrnou kopií reality, což dokládá obrázek 24.



Obrázek 22 Průběh vysouvání a zasouvání pístnice s P regulátorem



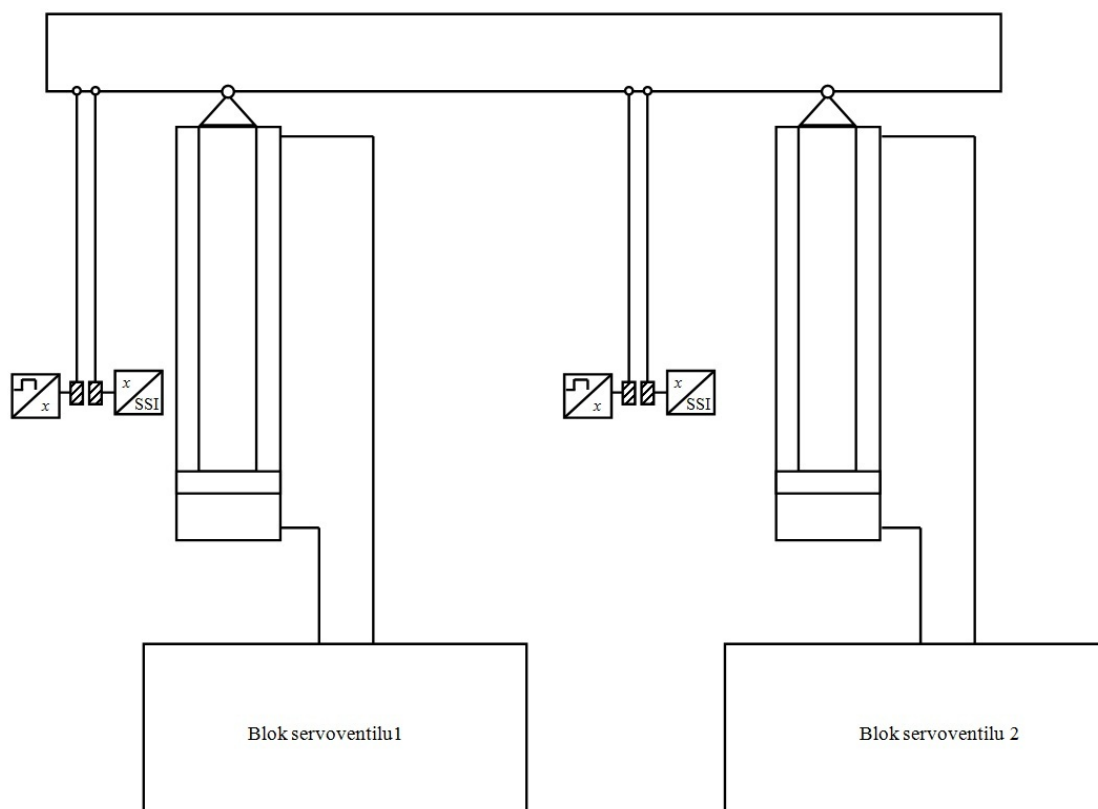
Obrázek 23 Průběh vysouvání a zasouvání s PT1 regulátorem



Obrázek 24 Porovnání HiL simulace s měřením na elektrohydraulickém standu

7 Elektrohydraulický servopohon pódiového stolu divadla v Krakově

Druhá průmyslová aplikace je zaměřena na elektrohydraulický servopohon pódiového stolu hlavního jeviště v krakovském divadle. Stůl je poháněn dvěma totožnými přímočarými hydromotory. Ovládání zajišťují dva čtyřcestné třípolohové (označované jako 4/3) třístupňové servoventily. Výkresovou dokumentaci dodala firma NORTECH, s.r.o. Elektrohydraulický pohon stolu je zobrazen na obrázku 25. Bloky servoventilu obsahují samotný servoventil a další ochranné a obtokové ventily.

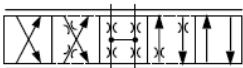


Obrázek 25 Elektrohydraulický servopohon hlavního pódia divadla v Krakově

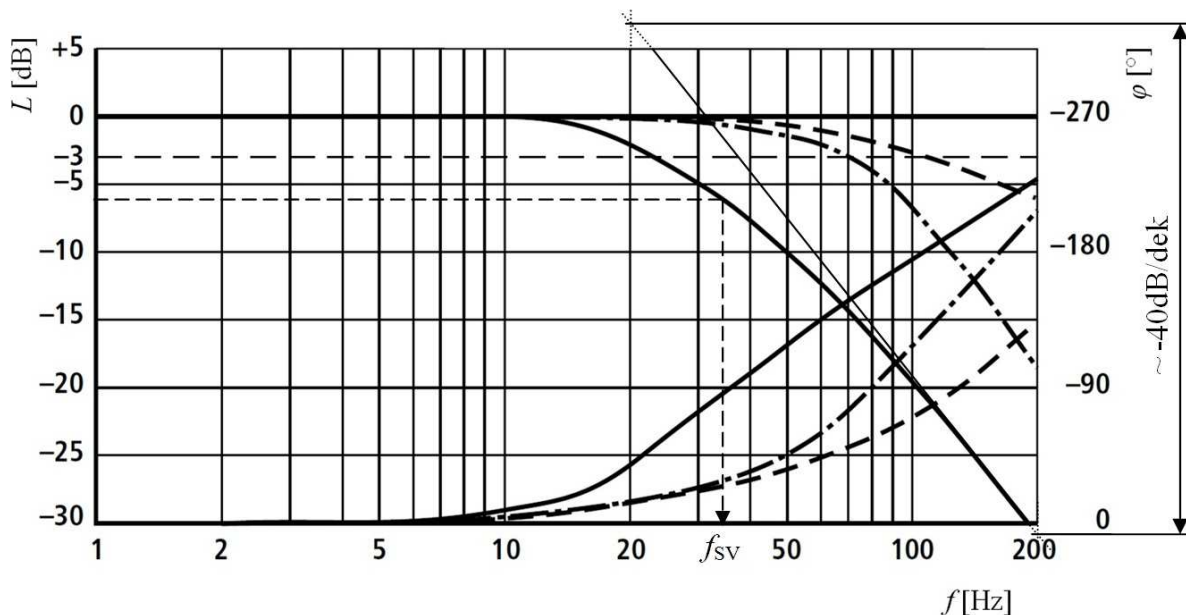
Hydraulické pohony jsou v divadelní technice hojně používány. Zejména pak díky malým zástavovým prostorům vzhledem k vyvozovaným výkonům, tichému chodu, velké variabilitě převodu rychlostí a pohybů mezi hydrogenerátorem a hydraulickým motorem, schopnosti kombinovat hydraulický převod s jinými druhy převodu energie (např. kladkové převody). Hlavní aplikací je tedy rozličný pohyb pódíí a pódiových stolů (svislý ale i vodorovný) a kulís.

7.1 Parametry modelu

Na obrázku 26 je z katalogového listu [Bosch Rexroth, AG, 2007a] převzatá amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika (dále AFKCH) servoventilu s typovým označením 4WRDE 16 V200L-5X/6L 24 K9/WG152MR. Význam znaků v označení je následující:

- 4WRDE – elektricky ovládaný třístupňový čtyřcestný regulační ventil s integrovanou elektronikou
- 16 – jmenovitá velikost
- V – průchod tlakové kapaliny v jednotlivých polohách (čárkovaně jsou naznačeny mezipolohy) 
- 200 – jmenovitý průtok $200\text{dm}^3\cdot\text{min}^{-1}$
- L – lineární charakteristika
- 5X – výrobní řada 50 ÷ 59
- 6L – servo řízení ventilů velikost 6
- 24 – napájecí napětí +24V
- K9 – elektrické připojení bez konektoru se zástrčkou
- WG152 – s rozvodnou deskou ventilu 24VSS
- M – těsnění NBR (O-kroužek)
- R – R-kroužky

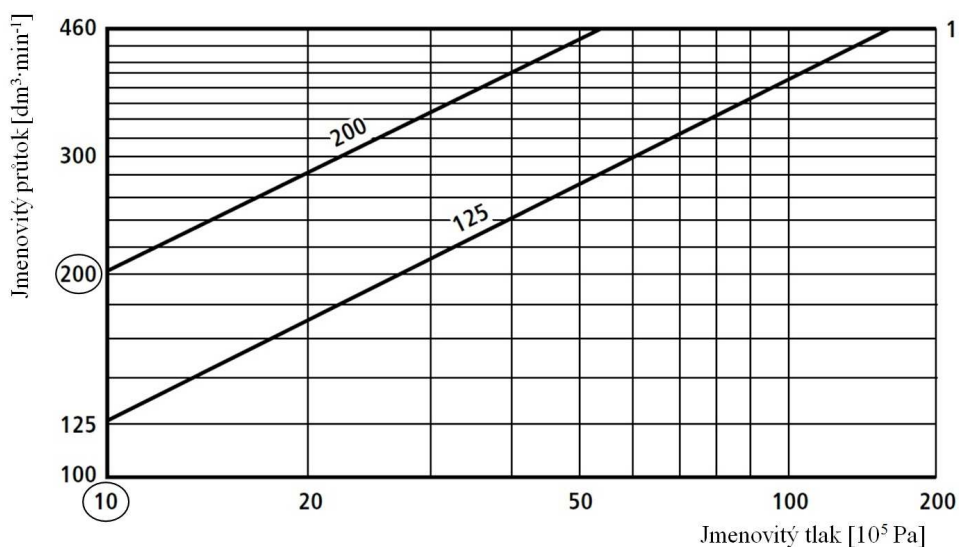
Do AFKCH servoventilu byla dokreslena asymptota. Servoventil modelujeme jako proporcionální dynamický člen se setrvačností druhého řádu. Logaritmická amplitudová kmitočtová charakteristika (LAKCH) tohoto členu je zpočátku nulová a od frekvence zlomu má sklon -40dB/dek. Sklon asymptoty na obrázku 26 se této hodnotě velmi blíží. U tohoto členu je největší chyba (rozdíl mezi ideálním a reálným průběhem LAKCH) při poklesu -6dB. Pro tuto hodnotu je odečtena vlastní frekvence servoventilu $f_{sv}=35\text{Hz}$. Průběh LAKCH tvarem odpovídá tlumení 0,8.



Obrázek 26 Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika servoventilu [Bosch Rexroth, AG, 2007a]

Dále je potřeba určit průtokové zesílení. To se zjišťuje z charakteristiky na obrázku 27, která se měří po propojení výstupů A a B servoventilu. Z grafu odečtenou tlakovou ztrátu 1MPa pro jmenovitý průtok $200\text{dm}^3\cdot\text{min}^{-1}$ je proto potřeba podělit dvěma, jelikož tato hodnota je změřena po průchodu kapaliny přes dvě škrťací hrany servoventilu. Průtokové zesílení B_{SV} je rovno

$$B_{SV} = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{200 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{5 \cdot 10^5}} = 4,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \sqrt{\text{Pa}}} . \quad (25)$$

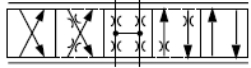


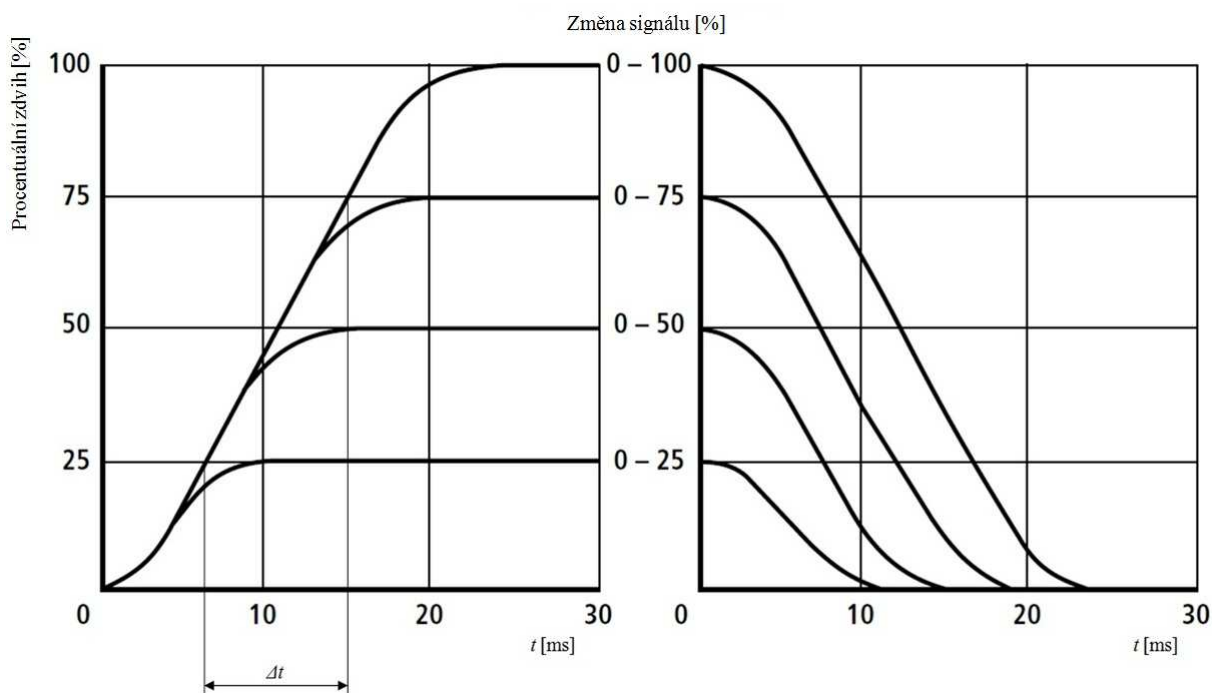
Obrázek 27 Závislost jmenovitého průtoku na jmenovitém tlaku [Bosch Rexroth, AG, 2007a]

Posledním parametrem, který se dá z katalogového listu vyčíst, je maximální rychlost servoventilu. Tu určíme z charakteristiky servoventilu na obrázku 28. Maximální rychlost servoventilu je dána jako podíl změny poměrného zdvihu (dráhy) a změny času. K maximální rychlosti dochází při konstantním sklonu průběhu zdvihu. Rozdíl byl odečten mezi 25 a 75% (tedy mezi 0,25 a 0,75 v bezrozměrných jednotkách). Tomu odpovídající změna času činí 9,4ms. Maximální rychlost je tedy rovna

$$v_{SVMAX} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0,5}{9,4 \cdot 10^{-3}} = 53,2 \text{ s}^{-1} \quad (26)$$

Poslední hodnotou pro model servopohonu je krytí šoupátka. Ze schematické

značky  plyne, že krytí bude negativní. Hodnota se v katalogovém listu nevyskytuje, je zvolena 1% (-0,01).




Obrázek 28 Závislost zdvihu servoventilu na čase pro různé procentuální otevření [Bosch Rexroth, AG, 2007a]

Tím by byly určeny všechny parametry servoventilu. Přímočarý hydromotor je použit CDH1 MT4/125/90/4800A11/D1CSUTWW, jehož 3D model je na obrázku 29. Význam znaků v označení je následující:

- CD – hydromotor s jednostranně vyvedenou pístnicí (Diferenciální)
- H1 – výrobní série

- MT4 – montážní typ s radiálním čepem, viz obrázek 29
- 125 – průměr pístu [mm]
- 90 – průměr pístnice [mm]
- 4800 – délka zdvihu [mm]
- A – design, dno i hlava válce jsou opatřeny přírubou
- 11 – postup instalace a zapojení
- D – verze připojovacích otvorů, dle ISO6162

- 1 – poloha připojovacích otvorů na hlavě a na dně válce  . Pohled ze strany pístnice
- C – pochromovaná pístnice
- S – montován se samostatnou vidlicí CGAS
- U – bez tlumení pohybu v koncových polohách
- T – verze těsnění vhodná pro minerální oleje HL, HLP a HFA podle DIN51524 – těsnění servo kvality pro snížení tření
- WW – bez dalších nastavení



Obrázek 29 3D model přímočarého hydromotoru, typ MT4

Dále je potřeba určit svodovou propustnost. Při uvažovaném ztrátovém průtoku (z prostoru pístu do prostoru pístnice) $0,05 \text{ dm}^3 \cdot \text{min}^{-1}$ a tlakovém spádu 5MPa vyjde

$$G_i = \frac{Q_L}{\Delta p} = \frac{5 \cdot 10^{-5}}{5 \cdot 10^6} = 1,67 \cdot 10^{-13} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{Pa}} \quad (27)$$

Na výkresové dokumentaci jsou dále udány požadavky na maximální rychlost pohybu $0,3 \text{ m} \cdot \text{s}^{-1}$, redukovaná hmotnost na jeden hydromotor 7000kg, minimální vlastní frekvence hydromotoru 6,04Hz. Poslední hodnotu využijí k určení součinitele tlumení *b*. Ten je dán vztahem

$$b = \frac{2 \cdot m \cdot \xi_{\text{HM}}}{T_{\text{HM}}} [\text{NOSKIEVIČ, 1999}], \quad (28)$$

kde vlastní frekvence se vypočte ze známého vztahu

$$f_{\text{HM}} = \frac{1}{2 \cdot \pi \cdot T_{\text{HM}}}. \quad (29)$$

Vztah (29) dosadím do vztahu (28) a určím velikost součinitele tlumení

$$b = 4 \cdot m \cdot \xi_{\text{HM}} \cdot \pi \cdot f_{\text{HM}} = 4 \cdot 7000 \cdot 0,15 \cdot \pi \cdot 6,04 = 79695,92 \doteq 80000 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}. \quad (30)$$

Hodnota součinitele poměrného tlumení ξ_{HM} je u přímočarých hydromotorů velmi nízká. Pohybuje se v rozmezí $0,05 \div 0,2$. Toto je jejich nepříjemná vlastnost. Do vzorce (30) byla dosazena hodnota 0,15.

Z katalogového listu [Bosch Rexroth, AG, 2005] byla určena hmotnost 9,2kg na 100mm pístnice. V mém případě má pístnice délku 4800mm, tudíž její hmotnost je 441,6kg. Tuto hmotnost přičtu k hmotnosti redukované na jeden hydraulický válec. Tabulka 3 shrnuje veškeré parametry přímočarého hydromotoru a servoventilu.

Servoventil		Přímočarý hydromotor	
Vlastní frekvence f_{SV} [Hz]	35	Vlastní frekvence f_{HM} [Hz]	6,04
Tlumení ξ_{SV} [-]	0,8	Zdvih x_{MAX} [m]	4,8
Průtokové zesílení $B_{\text{SV}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \sqrt{\text{Pa}}} \right]$	$4,7 \cdot 10^{-6}$	Průměr válce d [m]	0,125
Krytí šoupátka x_{SV0} [-]	-0,01	Průměr pístnice d_{B} [m]	0,09
Maximální rychlost v_{SVMAX} [s^{-1}]	53,2	Hmotnost m [kg]	7441,6
		Tlumení $b \left[\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right]$	80000
		Svodová propustnost $G_i \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{Pa}} \right]$	$1,6 \cdot 10^{-13}$
		Modul objemové stlačitelnosti kapaliny K [Pa]	$1,4 \cdot 10^9$

Tabulka 3 Parametry modelu pódiového stolu

7.2 Návrh řídicího systému

Opět dosadím do vzorce (8) a vypočtu součinitel

$$\kappa = \frac{f_{SV}}{f_{HM}} = \frac{35}{6,04} = 5,8. \quad (31)$$

Součinitel κ vyšel větší jak 3, tudíž je potřeba použít stavový regulátor. Stavový regulátor ke své funkci potřebuje další zpětnou vazbu. Používá se buď zpětná vazba od tlaku, nebo od zrychlení. V případě tlakové zpětné vazby bývá zvykem měřit rozdíl tlaků v komorách A i B hydromotoru. U řídicího systému HNC100 stačí měřit jeden tlak (p_A), stavová regulace je vhodně nastavena korekčními parametry.

Opět určím teoretickou hodnotu kritického zesílení regulátoru

$$K_{Rkrit} = 2 \cdot \pi \cdot f_{HM} \cdot \left(\frac{K_{krit}}{\omega_m} \right) \cdot \frac{1}{K_O} = 2 \cdot \pi \cdot 6,04 \cdot 0,62 \cdot \frac{1}{0,48} = 49 \frac{V}{m}. \quad (32)$$

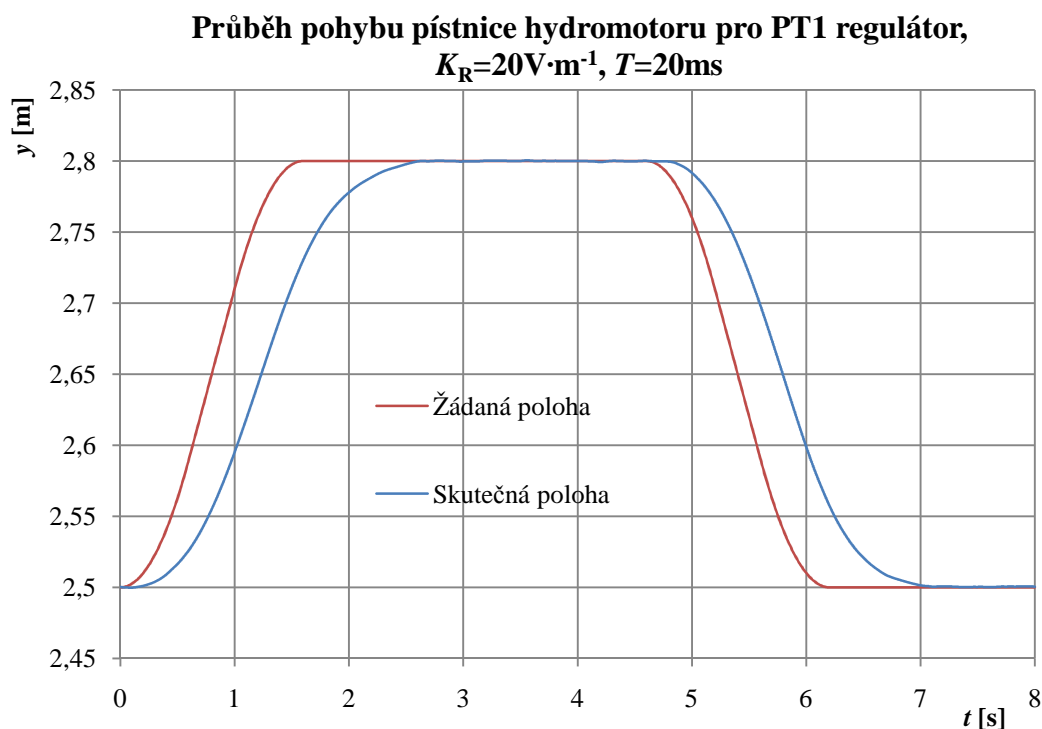
7.3 Ověření navrženého řídicího algoritmu metodou HiL

Nejprve jsem zkoušel řídit pohon pódiového stolu bez stavového regulátoru. Použití stavového regulátoru si vyžaduje vyšší náklady, jelikož na reálném systému musíme použít minimálně o jeden snímač (tlaku nebo zrychlení) více. Další zvýšení nákladů může být spjato s použitím samotného stavového regulátoru.

Simulací HiL bylo zjištěno, že bez stavového regulátoru je nejlepší použití regulátoru PT1 se zesílení $20V \cdot m^{-1}$ a časovou konstantou 20ms (obrázek 30). Při těchto parametrech regulátoru byla chyba polohy 3,2mm. Chyba sledování je větší než u elektrohydraulického výukového stendu. To ovšem v jevištní technice většinou nevádí. Zde nepožadujeme přesné sledování žádané veličiny při zasouvání a vysouvání, nýbrž minimální chybu polohy v ustálených stavech.

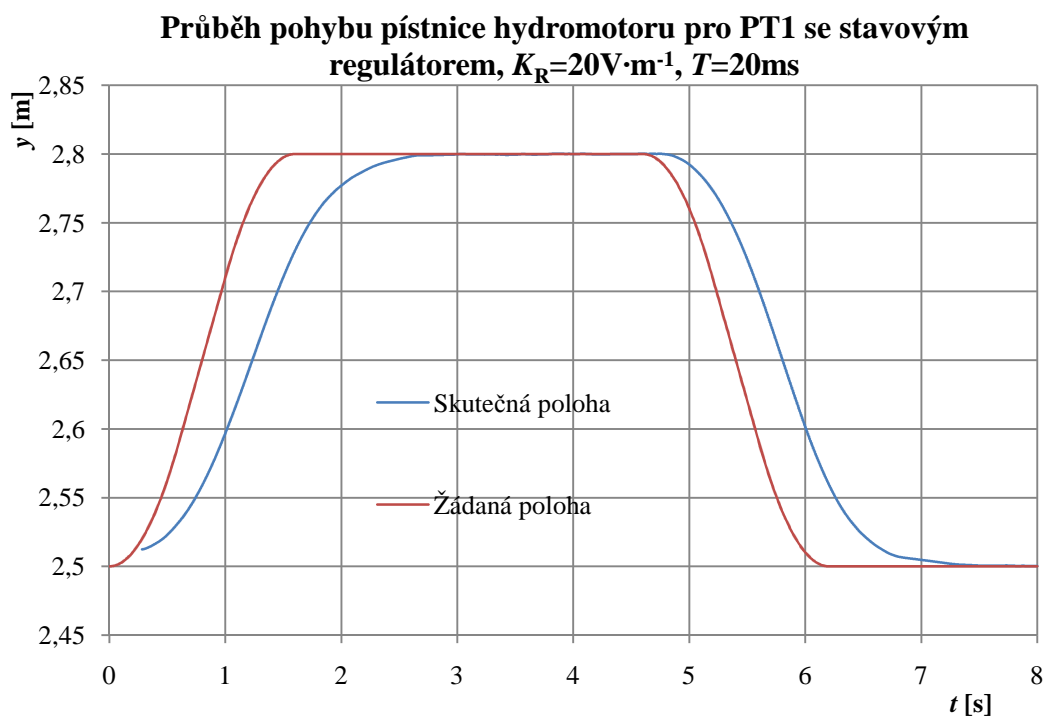
Poté byl použit stavový regulátor. Měření bylo provedeno pro stejné nastavení PT1 regulátoru a zároveň použitého regulátoru stavového. Nastavení korekčních parametrů stavového regulátoru je závislé na poměru ploch přímočarého hydromotoru. V případě přímočarého hydromotoru, jehož parametry jsou v tabulce 3, vychází poměr

$$\alpha = \frac{S_A}{S_B} = \frac{d_A^2}{d_B^2} = \frac{0,125^2}{0,09^2} = 1,92. \quad (33)$$



Obrázek 30 Průběh vysouvání a zasouvání s PT1 regulátorem

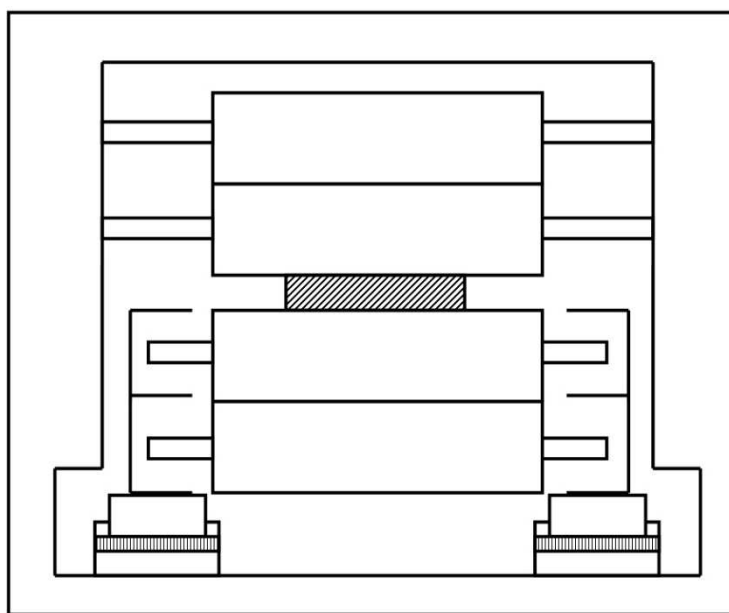
Se stavovým regulátorem (obrázek 31) bylo dosaženo chyby polohy 0,8mm.



Obrázek 31 Průběh vysouvání a zasouvání se stavovým regulátorem

8 Elektrohydraulický servopohon stavěcího zařízení

Stavěcí zařízení slouží jako pohon válcovací stolice. Válcovací stolice se skládá z dvou opěrných válců a dvou pracovních válců, mezi nimiž je umístěn válcovaný materiál (obrázek 32). Používají se dvě různá uspořádání. Na obrázku 32 uvedené, kde stavěcí jednotka zdvihá spodní dva válce, přičemž druhé dva jsou pevně uchyceny v rámu. Druhým způsobem je tlačení horních dvou válců směrem dolů a pevné uchycení spodních dvou válců.



Obrázek 32 Princip válcovací stolice

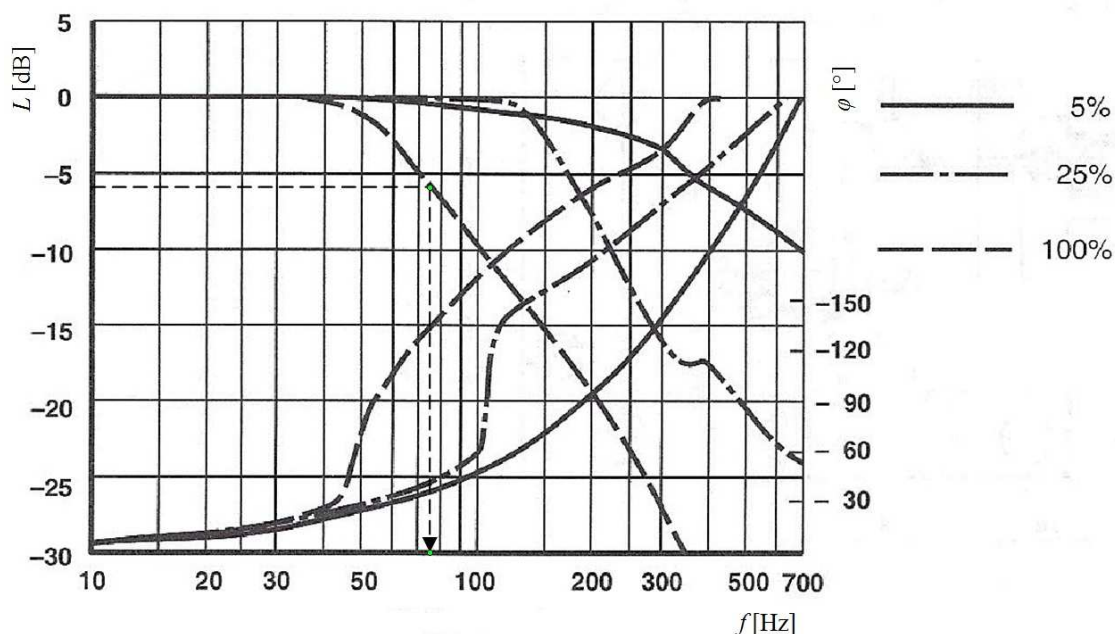
Použity jsou dva jednočinné přímočaré hydromotory s jednostranně vyvedenou pístnicí (viz kapitola 3.3 obrázek 6).

8.1 Parametry modelu

Postup při získávání parametrů byl obdobný jako u pohonu pódiového stolu divadla v Krakově. Použitý servoventil je opět od firmy Bosch Rexroth AG. Jeho označení je 4WSE 3EE 32. Význam jednotlivých znaků je následující:

- 4WSE 3E – elektricky ovládaný třístupňový čtyřcestný servoventil s integrovanou elektronikou
- E – s elektrickou zpětnou vazbou
- 32 – jmenovitá velikost

Z amplitudo-fázové kmitočtové charakteristiky (obrázek 33) byla pro pokles -6dB odečtena vlastní frekvence servoventilu 75Hz a součinitel poměrného tlumení 0,8.



Obrázek 33 Amplitudo-fázová kmitočtová charakteristika servoventilu

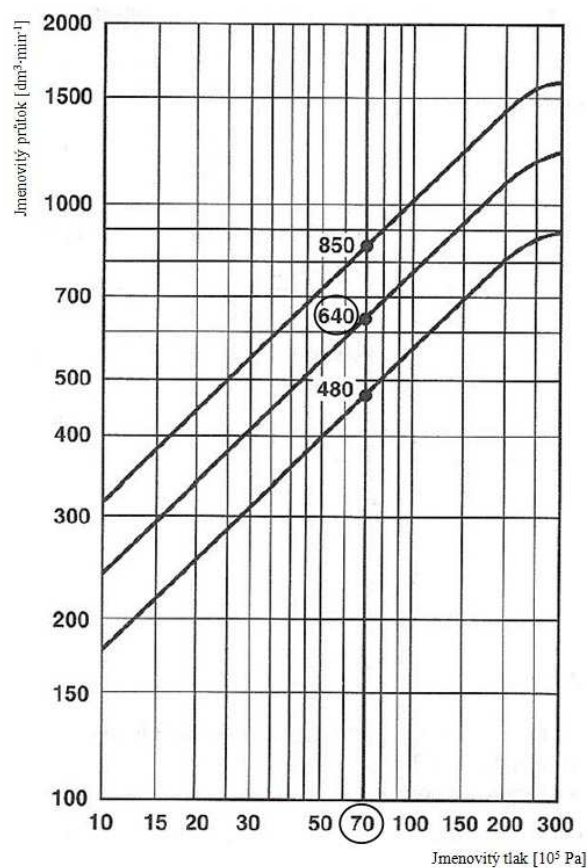
Z charakteristiky na obrázku 34 byly určeny parametry pro výpočet průtokového zesílení servoventilu B_{SV}

$$B_{SV} = \frac{Q}{\sqrt{\Delta p}} = \frac{640 \cdot 10^{-3}}{\sqrt{3,5 \cdot 10^6}} = 5,7 \cdot 10^{-6} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \sqrt{\text{Pa}}} \quad (34)$$

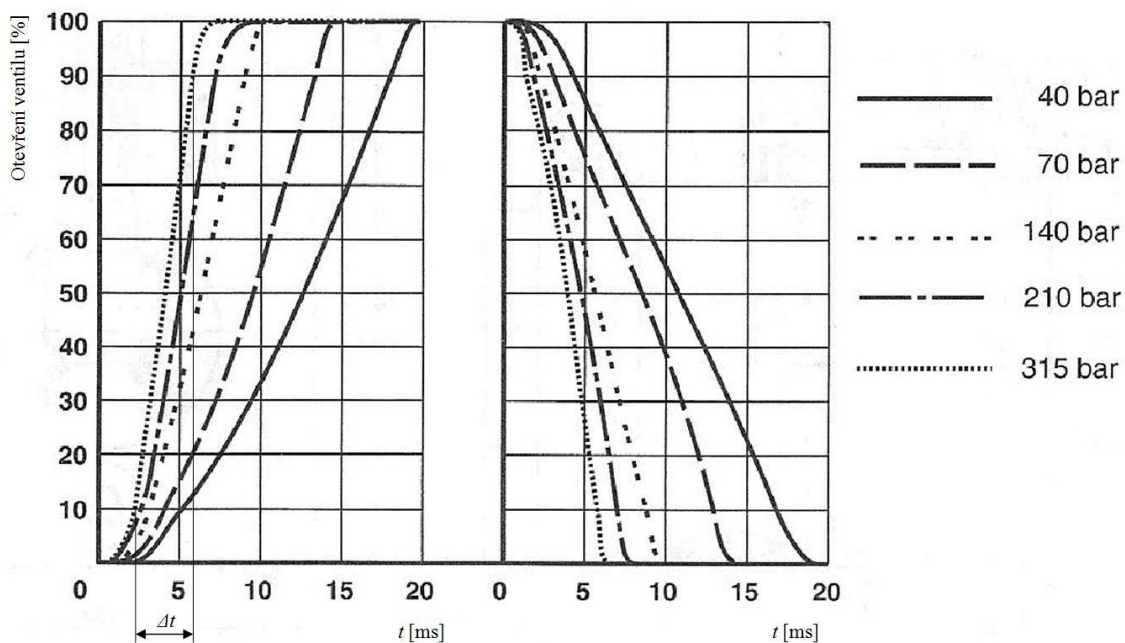
Maximální rychlost servoventilu byla určena podle charakteristiky na obrázku 35 pro pracovní tlak 31MPa. Její velikost je

$$v_{SV\text{MAX}} = \frac{\Delta x}{\Delta t} = \frac{0,8}{3,5 \cdot 10^{-3}} = 228,5 \text{ s}^{-1} \quad (35)$$

Krytí servoventilu bylo uvažováno, stejně jako u pohonu pódiového stolu divadla v Krakově, -0,01.



Obrázek 34 Závislost jmenovitého průtoku na jmenovitém tlaku



Obrázek 35 Závislost zdvihu servoventilu na čase pro různé jmenovité pracovní tlaky

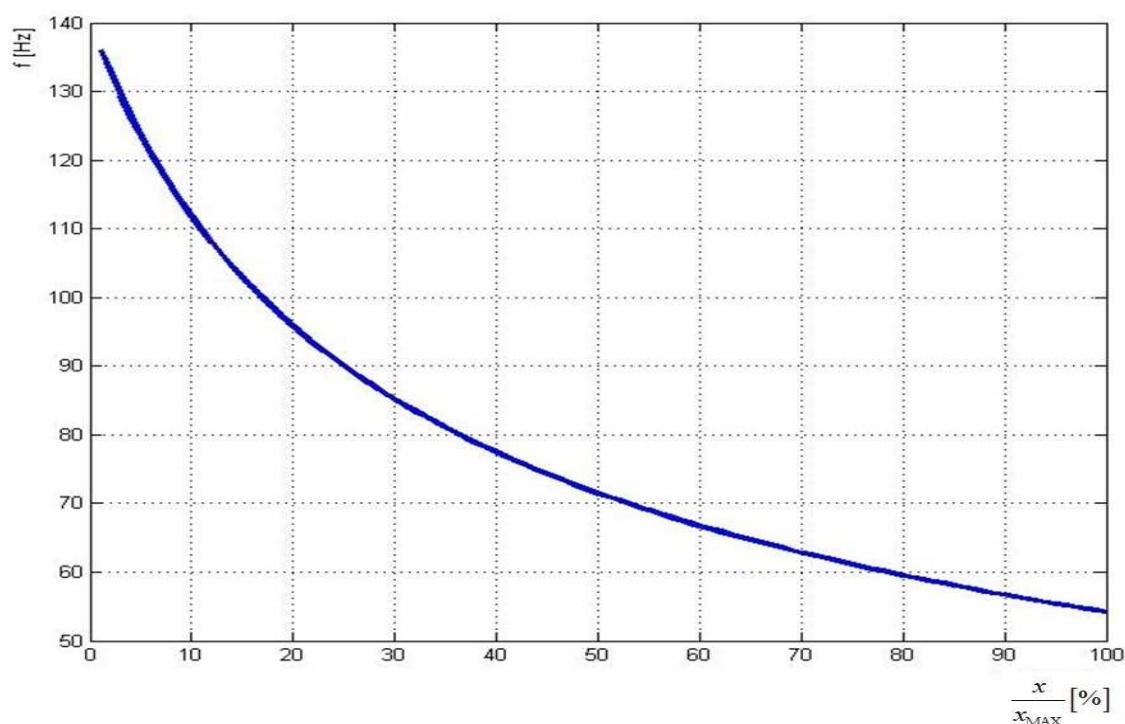
U hydromotoru byla určena vlastní frekvence podle vztahu vycházejícího z rovnice (17). Jelikož je pod tlakem pouze prostor na straně A hydromotoru, změní se vzorec pro vlastní frekvenci na

$$f_{\text{HM}} = \frac{1}{2 \cdot \pi} \cdot \sqrt{\frac{K}{m} \cdot \frac{S^2}{S \cdot x + V_0}}, \quad (36)$$

kde V_0 je objem kapaliny pod tlakem při nulovém, resp. maximálním zdvihu hydromotoru. Objem V_0 byl počítán jako objem ve čtyřech 5m dlouhých hadicích světlosti 32mm

$$V_0 = 4 \cdot \pi \cdot \frac{d^2}{4} \cdot l = \pi \cdot 0,032^2 \cdot 5 = 0,016 \text{m}^3. \quad (37)$$

Jak vidno ze vzorce (36), vlastní frekvence je opět závislá na zdvihu x , tato závislost je zobrazena na obrázku 36.



Obrázek 36 Závislost vlastní frekvence na poměrném zdvihu

Minimum vlastní frekvence na obrázku 36 je při maximálním zdvihu. Válcovací stolice ovšem málokdy pracují při tomto zdvihu. Pracovní bod stavěcích jednotek se pohybuje zhruba mezi 30÷50% maximálního zdvihu. Vlastní frekvence do modelu tedy bude uvažována při 40% zdvihu 77,4Hz.

Svodová propustnost je počítána pro uvažovaný průsak $5 \cdot 10^{-4} \text{ dm}^3 \cdot \text{min}$ a tlakový spád 10MPa

$$G_i = \frac{Q_L}{\Delta p} = \frac{5 \cdot 10^{-4}}{10 \cdot 10^6} = 8,3 \cdot 10^{-13} \frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{Pa}}. \quad (38)$$

Součinitel tlumení b je určen dosazením do vztahu (30)

$$b = 4 \cdot m \cdot \xi_{\text{HM}} \cdot \pi \cdot f_{\text{HM}} = 4 \cdot 145000 \cdot 0,15 \cdot \pi \cdot 54,2 \doteq 15 \cdot 10^6 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}. \quad (39)$$

Veškeré parametry stavěcí jednotky válcovací stolice jsou shrnuty v tabulce 4.

Servoventil		Přímočarý hydromotor	
Vlastní frekvence f_{SV} [Hz]	75	Vlastní frekvence f_{HM} [Hz]	77,4
Tlumení ξ_{SV} [-]	0,8	Zdvih x_{MAX} [m]	0,08
Průtokové zesílení $B_{\text{SV}} \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \sqrt{\text{Pa}}} \right]$	$5,7 \cdot 10^{-6}$	Průměr válce d [m]	1,2
Krytí šoupátka x_{SV0} [-]	-0,01	Průměr pístnice d_b [m]	1,15
Maximální rychlost v_{SVMAX} [s^{-1}]	228,5	Hmotnost m [kg]	145000
		Tlumení $b \left[\frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}} \right]$	$15 \cdot 10^6$
		Svodová propustnost $G_i \left[\frac{\text{m}^3}{\text{s} \cdot \text{Pa}} \right]$	$8,3 \cdot 10^{-13}$
		Modul objemové stlačitelnosti kapaliny K [Pa]	$1,4 \cdot 10^9$

Tabulka 4 Parametry modelu stavěcí jednotky

8.2 Návrh řídicího systému

Poměr vlastních frekvencí je v tomto případě roven

$$\kappa = \frac{f_{\text{SV}}}{f_{\text{HM}}} = \frac{75}{77,4} = 0,97. \quad (40)$$

Velikost součinitele κ je na rozmezí použití P regulátoru, nebo PT1 regulátoru. Vypočteno tedy bude jak zesílení pro P regulátor, tak případná časová konstanta pro PT1 regulátor.

$$K_{\text{Rkrit}} = 2 \cdot \pi \cdot f_{\text{HM}} \cdot \left(\frac{K_{\text{krit}}}{\omega_m} \right) \cdot \frac{1}{K_o} = 2 \cdot \pi \cdot 77,4 \cdot 0,52 \cdot \frac{1}{0,008} = 31,6 \cdot 10^3 \frac{\text{V}}{\text{m}} = 31,6 \frac{\text{V}}{\text{mm}} \quad (41)$$

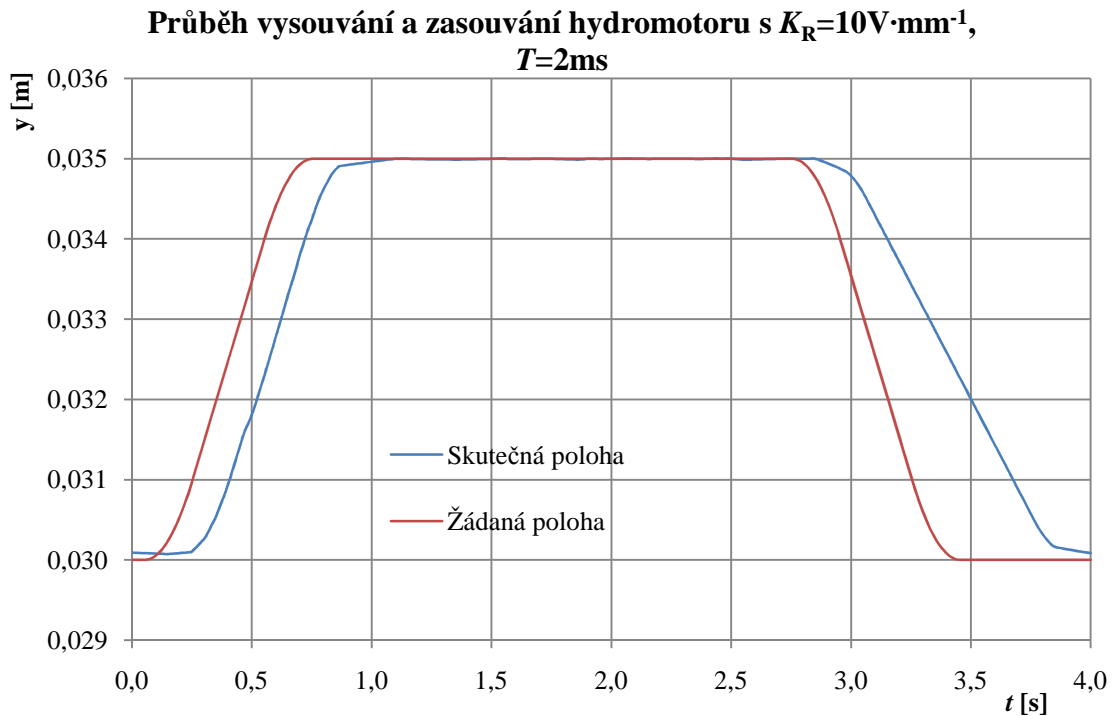
$$T = \frac{1}{\pi \cdot f_{\text{HM}}} = \frac{1}{\pi \cdot 77,4} = 4\text{ms}. \quad (42)$$

8.3 Ověření navrženého řídicího algoritmu metodou HiL

Při HiL simulaci nastal problém s velikostí kroku 0,002s. Jelikož se v parametrech modelu (viz tabulka 4) vyskytují větší čísla (hlavně zátěžná síla $\sim 1,5 \cdot 10^6 \text{N}$ a součinitel tlumení $b \ 1,5 \cdot 10^7 \frac{\text{N} \cdot \text{s}}{\text{m}}$), docházelo k numerickým nestabilitám a model počítal špatné výsledky.

Proto byl krok simulace snížen na hodnotu $2 \cdot 10^{-5} \text{s}$, tedy vzorkovací frekvenci 50kHz. Toto stonásobné navýšení počtu zpracovávaných vzorků kladlo ještě větší nároky na použitý hardware osobního počítače.

HiL simulací jsem zjistil, že lepší je použití PT1 regulátoru. Parametry regulátoru byly $K_R = 10 \text{V} \cdot \text{mm}^{-1}$, $T = 2\text{ms}$. Pomocí tohoto regulátoru bylo dosaženo žádané přesnosti polohy $\pm 0,01\text{mm}$. Naměřený průběh je na obrázku 37.



Obrázek 37 Průběh vysouvání a zasouvání s PT1 regulátorem

9 Závěr

Bakalářská práce se zabývá konfigurací řídicího systému pomocí simulace Hardware in the Loop. V úvodu práce je vysvětlen význam této simulace a je popsán postup při její realizaci. Naznačeny jsou rovněž možnosti využití v technické praxi.

Dále je popsána stěžejní část HiL simulace a tou je matematický model reálné soustavy. Na něm závisí přesnost celé metody. V práci je zpracována úprava stávajícího modelu přímočarého hydromotoru. Ten je částí elektrohydraulického servopohonu, pro nějž je navrhován algoritmus řízení.

Hardwarem v názvu metody se rozumí použití reálného řídicího systému. K dispozici byl v praxi často používaný číslicový řídicí systém HNC100 firmy Bosch Rexroth AG.

Podrobně je popsáno propojení osobního počítače s řídicím systémem za účelem HiL simulace. Toto propojení umožňuje multifunkční měřicí karta DAQCard-6036E od společnosti National Instruments a Real-Time Windows Target Toolbox v programu Matlab-SIMULINK. Vysvětleno je rovněž programování číslicového systému, které zajišťuje program Win-Ped.

Výsledkem práce je návrh řídicích algoritmů pro 3 průmyslové aplikace elektrohydraulických servopohonů a jejich otestování pomocí HiL simulace. U první popisované aplikace – elektrohydraulického výukového stendu – byla provedena i verifikace. Tedy doladění parametrů modelu na základě výsledků měření na skutečné soustavě. Díky dostupnosti výukového stendu bylo provedeno porovnání mezi HiL simulací a průběhem naměřeným na reálném systému. Výsledky HiL jsou v tomto případě díky výše provedené verifikaci velice přesné.

Aplikace elektrohydraulického servopohonu pódiového stolu hlavního jeviště divadla v Krakově byla záměrně vybrána kvůli geometrickým rozměrům použitých přímočarých hydromotorů. Jedná se o velmi dlouhý štíhlý hydromotor, který je velmi náchylný k nestabilitě. Výsledky ukazují, že při řízení bez stavového regulátoru je dosaženo horší přesnosti skutečné polohy. Větší rozdíl mezi regulací bez a se stavovým regulátorem by byl u rychlostních nebo silových servopohonů.

Poslední popisovanou průmyslovou aplikací je elektrohydraulický servopohon stavěcí jednotky válcovací stolice. Tato aplikace byla vybrána opět s ohledem na použitý hydromotor. Zde je díky obrovským zátěžným silám (řádově MN) použit jednočinný hydromotor, který je vysouván tlakem kapaliny a zasouván zatěžující silou. Nejlepších výsledků v tomto případě bylo dosaženo s PT1 regulátorem. Setrvačnost je do regulátoru zařazena z důvodu prakticky získaných zkušeností při řízení celku servoventil – hydromotor.

Simulace metodou HiL je dnes velmi využívána. Nejvíce rozšířená je pravděpodobně v automobilovém a leteckém průmyslu. Její největší výhodou je testování řídicích systémů ještě před výrobou systémů řízených. Máme-li model řízeného systému, můžeme na něm odzkoušet celé koncepce řídicích algoritmů, čímž se vyhneme velkým finančním ztrátám při jejich výrobě. Metoda HiL je nástroj, který však umožňuje testovat i řízený systém. Dokážeme-li v modelu měnit popř. měřit určitý parametr, můžeme testovat jeho vliv na celý model.

V práci popisovaný postup při konfiguraci řídicího systému metodou HiL nalezne uplatnění především v situacích uvádění zařízení elektrohydraulických servopohonů do provozu. Konstruktor si může vyzkoušet, jaký algoritmus použije (a nastavit jeho parametry) ještě před tím, než se dostane k reálnému systému. Tím, že bude mít výchozí hodnoty, které pak pouze doladí, ušetří čas i finanční prostředky. Finanční škody by totiž mohly nastat při zkoušení řídicích algoritmů přímo na reálné soustavě (například rozkmitání hydromotoru a tím i zvedané zátěže). Při uvádění do provozu by mohlo dojít i k poškození samotného zařízení. Tyto finanční úspory převýší nutné náklady spočívající v pořízení softwaru a hotových modelů, či zaplacení člověka se zkušenostmi při vytváření matematických modelů.

Seznam použité literatury

ANDERLOHR, G., a další. 1991. *Fachtagung Hydraulik und Elektronik in der Bühnentechnik*. Lohr am Main : Mannesmann Rexroth GmbH, 1991. 200s.

BACKÉ, W. 1992. *Servohydraulik*. 6. Auflage. Aachen : Institut für hydraulische und pneumatische Antriebe und Steuerungen der Rheinisch-Westfälischen Technischen Hochschule Aachen, 1992. 270s.

Bosch Rexroth, AG. 2005. *Hydraulic cylinder - Mill type. Series CDH1/CGH1*. [Online] září 2005. [Citace: 24. března 2010] 44s. RE17331/09.05. Dostupný z WWW: <http://www.boschrexroth.com/country_units/america/united_states/sub_websites/brus_brh_i/en/products_ss/02_cylinders/a_downloads/re17331_2005-09.pdf>.

Bosch Rexroth, AG. 2007a. *4/3-Wege-Regelventile vorgesteuert mit elektrischer Wegrückführung und integrierter Elektronik (OBE). Typ 4WRDE*. [Online] září 2007. [Citace: 16. března 2010] 20s. RD29093/09.07. Dostupný z WWW: <http://www.boschrexroth.com/RDSearch/rd/r_29093/rd29093_2007-09.pdf>.

Bosch Rexroth, AG. 2007b. *Digitale Achsensteuerung HNC100. Kabelpläne*. [Online] duben 2007. [Citace: 24. března 2010] 12s. RD30131-Z/04.07. Dostupný z WWW: <http://www.boschrexroth.com/RDSearch/rd/r_30131-z/rd30131-z_2007-04.pdf>.

DÖRR, H., a další. 1986. *Příručka hydrauliky*. 1.vyd. Lohr am Main : Mannesmann Rexroth GmbH, 1986. Sv. II. ISBN 3-8023-0898-0.

FARANA, R. 2010. Zásady pro vypracování diplomové (bakalářské) práce. [Online] [Citace: 8. květen 2010]. Verze: E. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2010. 16s. Dostupný z WWW: <http://www.fs.vsb.cz/soubory/Zasady_pro_diplomky.pdf>.

Hardware-in-the-loop simulation. *Wikipedia - The Free Encyclopedia*. [Online] [Citace: 29. září 2009] Dostupný z WWW: <http://en.wikipedia.org/wiki/Hardware-in-the-loop_simulation>.

ISERMANN, R. 2006. *Fahrdynamik - Regelung: Modellbildung, Fahrerassistenzsysteme, Mechatronik*. 1. Auflage. Wiesbaden : Friedr. Viewegh & Sohn Verlag | GWV Fachverlage GmbH, 2006. ISBN-10 3-8348-0109-7.

- JELÍNEK, P. 2007. Simulace Processor In the Loop a Hardware In the Loop. *Automa - časopis pro automatizační techniku*. [Online] květen 2007. [Citace: 25. září 2009] Dostupný z WWW: <http://www.odbornecasopisy.cz/index.php?id_document=34311>.
- KOČÍ, P. 2007. *Manažerská grafika*. [Učební text] Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2007. 157s. ISBN 978-80-248-1514-5.
- KOPÁČEK, J. a PAVLOK, B. 2005. *Tekutínové mechanismy*. 2.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005. 156s. ISBN 80-248-0856-0.
- MAIXNER, L. a kolektiv. 2006. *Mechatronika*. Brno : Computer Press, a.s., 2006. 280s. ISBN 80-251-1299-3.
- National Instruments. Data Sheet for NI DAQCard-6036E. [Online] [Citace: 21. březen 2010] Dostupný z WWW: <http://www.ni.com/pdf/products/us/4daqsc205-207_229_238-243.pdf>.
- NOSKIEVIČ, P. 1999. *Modelování a identifikace systémů*. 2.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 1999. 280s. ISBN 80-248-0856-0.
- NOSKIEVIČ, P. 2001. *Simulation, analysis and laboratory control of hydraulic servo drives using Matlab-SIMULINK*. Ostrava : VŠB-Technical university of Ostrava, 2001. Proceedings of the 2nd International Workshop on COMPUTER SOFTWARE FOR DESIGN, ANALYSIS AND CONTROL OF FLUID POWER SYSTEMS. p 124-132.
- NOSKIEVIČ, P. 2002a. Hydrostatické pohony a jejich řízení. *Automa*. 2002, číslo 1, stránky 8-12.
- NOSKIEVIČ, P. 2002b. Návrh přímočarých hydraulických pohonů s ohledem na poměr činných ploch. *Automa*. 2002, číslo 7, stránky 34-36.
- SCHMITT, A. 1981. *Příručka hydrauliky*. Lohr am Main : G.L. Rexroth GmbH, 1981. 226s.
- SOUČEK, P. 1984. *Servomechanismy*. Dotisk. Praha : České vysoké učení technické v Praze, 1984. 207s.
- SOUČEK, P. 1992. *Elektrohydraulické servomechanismy*. Dotisk. Praha : České vysoké učení technické, 1992. 158s. ISBN 80-01-00376-0.

VÍTEČKOVÁ, M. 2005. *Slovník L- a Z-transformace s řešenými příklady*. 1.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2005. 76s. ISBN 80-248-0851-x.

VÍTEČKOVÁ, M. a VÍTEČEK, A. 2006. *Anglicko-český slovník základních pojmů z oblasti automatického řízení*. 1.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2006. 96s. ISBN 80-248-1069-7.

VÍTEČKOVÁ, M. a VÍTEČEK, A. 2008. *Základy automatické regulace*. 2.vyd. Ostrava : VŠB-Technická univerzita Ostrava, 2008. 244s. ISBN 978-80-248-1924-2.